

# 科学技術動向

2003

1

No.22

## 科学技術トピックス

### ▶ ライフサイエンス分野

- ①新しい原理に基づいたバイオセンサー —拡散検出バイオセンサー—
- ②プロテアゾーム阻害剤が夢のがん治療薬になる可能性が示された

### ▶ 情報通信分野

- ①次世代不揮発性メモリに有望な新技術が開発される

### ▶ 環境分野

- ①バイオマス推進の総合指針  
「バイオマス・ニッポン総合戦略」が策定される

### ▶ ナノテク・材料分野

- ①シリコン発光素子で化合物半導体に匹敵する効率を達成

### ▶ エネルギー分野

- ①米国における高レベル放射性廃棄物処分研究の動向
- ②軽量で曲げられるフレキシブルな  
プラスチック太陽電池の研究開発が進展

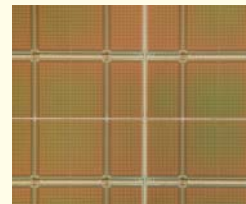
### ▶ 製造技術分野

- ①半導体デバイスの生産コスト低減をもたらす  
リソグラフィー補助プロセス

## 特集1 RNA 研究の動向

## 特集2 バイオインフォマティクスの技術動向

## 特集3 循環型社会の構築を目指した 廃棄物処理の技術開発と研究動向





## 科学技術トピックス

### ライフサイエンス分野

4

#### ①新しい原理に基づいたバイオセンサー — 拡散検出バイオセンサー —

溶液中でのタンパク質拡散係数をモニターする、新しい原理に基づくバイオセンサー「拡散検出バイオセンサー」が最近報告された。従来の金薄膜にタンパク質を固定化するなどの面倒な操作が必要なく、通常の反応溶液中でタンパク質同士の結合を1秒の時間分解能で観測することができる。さらに、薬品とタンパク質との結合により起こる構造変化も検出可能であり、従来のバイオセンサーの性能を超えたものでもある。この手法は、タンパク質-タンパク質反応の解析をさらに容易にし、発展させる可能性を持っている。

#### ②プロテアゾーム阻害剤が夢のがん治療薬になる可能性が示された

プロテアゾーム（Proteasome：細胞中のタンパク質を分解する酵素複合体）を標的とする初めての抗がん剤PS-341（米国バイオベンチャー企業Millenium Pharmaceuticals, Inc.が開発）の臨床試験（Phase II）が米国で行われている。化学療法剤耐性を示す多発性骨髄腫（multiple myeloma）を含め、血液関係のがんや固形がんなど様々な種類のがんに効果があるのではないかと期待を集めており、プロテアゾーム阻害剤のがんの新しい治療薬となり得るのか動向を注意する必要がある。

### 情報通信分野

5

#### ①次世代不揮発性メモリに有望な新技術が開発される

次世代不揮発性メモリ（電源を切っても記憶を保持するメモリ）は、現在のフラッシュメモリに代わりメモリカードや携帯電話など幅広い利用が期待され、数種の技術が開発中である。昨年12月に開催された電子デバイスに関する国際会議IEDM2002において、シャープ、Houston大学が電圧による薄膜の抵抗変化を利用した新規な不揮発性メモリRRAM（Resistance Random Access Memory）を発表し、大きな注目を集めた。これは他の次世代不揮発性メモリに比べ、1ビット当りの占有面積、消費電力、高速性等で同等か優れており今後の発展が期待される。

### 環境分野

6

#### ①バイオマス推進の総合指針「バイオマス・ニッポン総合戦略」が策定される

2002年12月27日、バイオマス資源の総合的な有効利用に関する「バイオマス・ニッポン総合戦略」が閣議決定された。本戦略は、バイオマス利活用技術の開発促進、地域の特性に応じた展開、循環型社会形成、地球温暖化防止を踏まえた全国的な利用推進の3つの視点から具体的な目標を示している。今後、バイオマスの生産・収集から変換・利用にいたるまで、各要素技術を一体とした技術開発、実用化が進展すると期待される。

### ナノテク・材料分野

6

#### ①シリコン発光素子で化合物半導体に匹敵する効率を達成

伊仏合弁の半導体大手メーカー、STマイクロエレクトロニクスは、薄膜材料SRO（Silicon Rich Oxide）に、希土類元素をイオン注入する技術により、シリコンベースの発光素子の効率を従来の100倍近く向上させる技術を確認したと発表した。新技術には、シリコン酸化物中にシリコン微細結晶が分散した薄膜材料に、エルビウムやセリウムといった希土類元素をイオン注入する技術が組み合わせて用いられている。これは化合物半導体を用いた発光素子に匹敵する性能であり、シリコン単一チップ上に光学機能と電子機能を集積化することが可能になる。

## エネルギー分野

7

## ①米国における高レベル放射性廃棄物処分研究の動向

米国では2002年7月に連邦議会上院がネバダ州ユッカマウンテンにおける高レベル放射性廃棄物処分計画を承認した。これまで地層処分に関する研究開発は、主にエネルギー省(DOE)傘下の国立研究所が実施しており、その研究項目は、亀裂性岩盤における核種移動メカニズムの解明、熱、化学反応など複数のプロセスの相互作用を考慮した性能評価研究、試験用坑道を用いた大規模加熱試験などである。一方、わが国ではユッカマウンテンとは異なり、地下水位が浅く、水分で飽和した岩石帯への処分が強いられるため、これに対応する技術開発やシステム設計が求められる。

## ②軽量で曲げられるフレキシブルなプラスチック太陽電池の研究開発が進展

軽量で曲げることができ、しかも透明・カラフルな太陽電池の研究開発が進展している。桐蔭横浜大学大学院 宮坂力教授らの研究グループは、薄いプラスチックフィルム上に形成する色素増感型太陽電池で、従来の変換効率の約1.8倍になる3.6%を達成した。将来はシリコン系の太陽電池では難しい、窓、カーテン、壁、携帯機器に貼り付け可能なフィルム型のフレキシブル素子としての用途が期待される。

## 製造技術分野

8

## ①半導体デバイスの生産コスト低減をもたらすリソグラフィー補助プロセス

半導体デバイス製造の微細加工技術は2～3年で世代交代が進んでいる。微細化の鍵はリソグラフィー(光照射によるパターン形成技術)の短波長化である。その露光装置(光照射によるパターン形成装置)は高価で、1世代毎に本体と周辺機器を更新すると生産コストの大幅な増大が避けられない。このほど、東京応化工業株式会社は、世代延命の技術として現行のレジスト(感光性樹脂)を用いて、より微細なパターンを得るために、補助剤の熱収縮の力を利用してレジストパターンの形状劣化を防ぐ手段を発表した。この技術により、高価な露光装置の更新時期を遅らせることができ、製造コスト低減につながると期待される。

## 特集—1

## RNA 研究の動向 — 9

近年、RNAは非常に機能的な分子であることが分かってきており、特に産業応用につながるリボザイム(酵素のような機能をもつRNA)やRNAi(RNAを介した遺伝子発現抑制機構)などの研究の進展により今後の発展性が大いに期待される。また、遺伝情報伝達経路におけるRNAの機能の重要性も認識されてきたことによって、総合的なゲノム科学研究を進める上でもRNA研究を充実させていく必要性が高まっている。

実際、RNAに関する文献数は1980年代後半から急増しており、世界的にもRNA研究が盛んになってきていることがうかがえる。RNA研究は発展途上の段階であり、今後、細胞内の全RNAを対象としたリボヌクレオーム研究を戦略的に推進していくことで、我が国独自の研究が展開できると考えられる。

我が国のRNA研究の活性化のためには、まずRNA研究者の裾野を広げることが重要である。それには従来からの科研費等による継続的なサポートに加えて、プロジェクト型のリボヌクレオーム研究に取り組んでいくことが必要である。その遂行にあたっては、求心力のあるセンターなどを中心に、基盤的な技術開発、網羅的なRNA機能解析、産業応用を目指したRNA分子工学等を総合的に進めるような体制を整備することが望まれる。こうした先導的な取組と、科研費等による大学や国公立研究機関などでの分散的な幅広い研究とを連携して進めていくことにより、我が国のRNA研究の質・量を高めるだけでなく、総合的なゲノム科学研究全体を推進していくことにもつながると期待される。

**特集—2 バイオインフォマティクスの技術動向** — 15

ヒトゲノムのドラフト解読が終了し、ゲノム研究の対象が配列から機能へと移りつつある。我が国はイネゲノムなど基盤技術での強みがあり、世界をリードするチャンスは十分にある。そこでは膨大なデータを効率よく処理し、そこから新たな知識を見出すための高度な情報技術が必要とされる。バイオインフォマティクスはこのような課題に体系的に取り組むための新しい学術分野である。バイオインフォマティクスの特徴は、ゲノム研究における問題の組み合わせ的な探索空間を絞り込み、体系的かつ網羅的な解析を可能とする点にある。そのためには情報科学的手法に加えて生物学・医学の知識に基づく解析データの評価も必要とされる。

ゲノム情報は飛躍的に増大しており、このままでは有効に活用できなくなる恐れがあるため、今後はゲノム配列データと解析情報の関連付け、データベース間の用語の統合が重要となってくる。また解析の大規模化に応じてより大きな計算パワーが必要となるが、これには解析処理の並列化が有効である。PCクラスターやグリッドは研究室レベルで高度な解析を低コストで実現できる方式である。ゲノム研究の焦点は配列から機能へ、個々の遺伝子から網羅的なタンパク質の解析へと移ってきており、そこでバイオインフォマティクスの果たす役割は極めて大きい。

バイオインフォマティクスはスピードが要求される分野であり、各国で研究資源の急速な投入が行われている。我が国では、必要とされる人材育成の動きが一部で見られるものの、その広がりはまだ十分ではなく大きな課題である。情報系、生物・医学系双方の知見を備えた人材の育成をさらに進めていく必要がある。そのためには、大学の教育課程・研究体制の見直しや、情報系、生物・医学系の研究者・技術者が知識やノウハウを共有しながら密接な協業の中で研究を進められる環境の整備が有効と考えられる。また、両分野の間で研究者・技術者の相互参入を促していくことも必要であろう。

**特集—3 循環型社会の構築を目指した  
廃棄物処理の技術開発と研究動向** — 22

循環型社会の構築のために、政府は容器包装のリサイクルをはじめとする5つの法律を施行あるいは公布し、産学官連携の下で様々な研究・技術開発に取り組んでいる。一方、企業と大学などの研究機関は、廃棄物ゼロを目指した研究・技術開発として、マテリアル、ケミカル、サーマルという3つのリサイクル手法に取り組んでいる。マテリアルおよびケミカルリサイクルでは、技術開発が進み再生成物の利用先も広がっているが、バージン原料を使った一般的な製造品に比べると原料の確保などで不利な点が多い。サーマルリサイクルでは電力事業が進展しているが、今後は廃棄物から有価ガスを発生させる方式への期待が高い。

研究・技術開発の結果として、あるリサイクル事業での生成品やエネルギーが他のリサイクル事業活動に利用されるというリサイクル事業間での連携の動きも現れている。今後は、バージン原料を用いた生産活動をする動脈産業と廃棄物を原料として生産活動をする静脈産業の双方が、社会システムとしての強い結びつきを形成していくことが期待される。

廃棄物を出さないことを目指した取り組みにはいくつかの成功事例があるが、今後の廃棄物処理の研究・技術開発においては、多くの課題を多面的に議論する必要がある。今後は、大学においても、その研究に自治体のニーズを反映させ、自治体が求める技術を開発することが必要である。また、自治体が大学の研究を助成することなども考えられる。さらに、大学での成果をスケールアップして事業化する際には、新たに生ずる技術的課題への対応や経済性を高める技術の開発も必要である。このような技術開発と事業化の流れにおいて、静脈産業を社会システムの一員として機能させるための支援策も重要である。

# 科学技術 トピックス

以下は科学技術専門家ネットワークにおける専門調査員の投稿（1月号は2002年12月7日より2003年1月10日まで）を中心に「科学技術トピックス」としてまとめたものです。センターにおいて、関連する複数の投稿をまとめ、また必要な情報を付加する等独自に編集するため、原則として投稿者の氏名は掲載いたしません。ただし、投稿をそのまま掲載する場合は、投稿者のご了解を得て、記名により掲載しています。

## ライフサイエンス分野

### ①新しい原理に基づいた バイオセンサー —拡散検出バイオセンサー—

今年のノーベル化学賞が、タンパク質の質量分析に道を開いた手法開発に与えられたことから分かるように、今後タンパク質の解析手法はますます重要になってくるであろう。特に、タンパク質同士の反応やタンパク質と薬品との結合を検出できるバイオセンサーは、非常に重要である。従来はこの検出手法として、表面プラズモン共鳴<sup>①</sup>バイオセンサーが用いられてきた。

2002年10月29日に大阪で開かれた特許技術ビジネスマッチングフォーラムにおいて、京都大学大学院理学研究科の寺嶋正秀教授

が、新しい原理に基づくバイオセンサー（拡散検出バイオセンサー）を報告した。これは溶液中でのタンパク質拡散係数をモニターすることによりタンパク質同士の結合を観測するものであり、従来の金薄膜にタンパク質を固定化<sup>②</sup>するなどの面倒な操作が必要なく、通常のセル中でタンパク質同士の結合を1秒の時間分解能で観測することができる。更に、薬品とタンパク質との結合により起こる構造変化も検出可能であり、従来のバイオセンサーの性能を超えたものでもある。この手法により、タンパク質—タンパク質反応の解析がさらに容易になり、発展する可能性が開けるであろう。

（京都大学大学院 寺嶋 正秀氏）

### ②プロテアゾーム阻害剤 が夢のがん治療薬になる 可能性が示された

プロテアゾーム(Proteasome)を標的とする初めての抗がん剤PS-341の臨床試験<sup>③</sup>（Phase II）が米国で行われており、化学療法剤耐性を示す多発性骨髄腫（multiple myeloma）を含め、血液関係のがんや固形がんなど様々な種類のがんに効果があるのではないかと期待を集めている。

PS-341は、米国バイオベンチャー企業 Millenium Pharmaceuticals, Inc.が開発した dipeptidyl boronic acid プロテアゾーム阻害剤であり、効果的かつ特異的にプロテアゾーム活性を阻害する。

プロテアゾームは細胞中のタン

## 用語説明

#### ①表面プラズモン共鳴

特定の波長の光を、特定の入射角度から金属の膜表面にあてると、光子のエネルギーが吸収されて反射されなくなる現象。この入射角度を共鳴角度とよび、共鳴角度は金属膜付近の質量の変化に応じて変わる。共鳴角度の変化を測定することにより、金属膜に固定化したタンパク質と溶液中の分子との相互作用を解析することができる。

#### ②固定化

①のような従来法では、タンパク質相互作用の反応および測定はガラスに金の薄膜を蒸着させたチップ上で行う。

そのためには、測定するタンパク質または分子のどちらか一方を薄膜上に固定（デキストランを介して）しなくてはならなかった。

#### ③臨床試験

新しい医薬品の製造承認を受けるために、ヒトを対象に行う試験。ヒトでの安全性を検討する第1相試験（フェーズⅠ）、小数の患者を対象に安全性・有効性を検討する第2相試験（フェーズⅡ）、多数の患者を対象とする第3相試験（フェーズⅢ）をもとに製薬会社が厚生労働省に製造承認申請を行う。（「日経バイオ最新用語辞典」第5版より）

パク質を分解する酵素複合体であり、cyclinDのような細胞分裂に関与するタンパク質や転写因子等を分解する働きをもつ。これにより細胞周期は正常に制御されている。そして、プロテアゾーム阻害剤はプロテアゾームのタンパク質分解活性を阻害することにより、細胞にアポトーシス（自死）を引き起こす。プロテアゾームの阻害はがん細胞を効果的に阻害し正常細胞には影響を与えないことが動物実験で明らかになっているが、PS-341によって起こされるapoptosisに関する分子生物学レベルでの詳細なメカニズムは明らかにされてなかった。

PS-341の臨床試験（phase II）は全米10カ所で様々な血液関係のがんに対して行われており、特に多発性骨髄腫の患者に対して効果があったとタフツ大医学部のSchenkein博士から報告された（Clin Lymphoma, 2002, 3: 49-55）。ハーバード大学医学部ダナーファーマーがん研究所のAnderson博士のグループは、遺伝子発現を追跡することによりPS-341のapoptosisを起こす分子機構を明らかにして米国科学アカデミー誌（Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2002, 99 (22) :14374-14379）に報告した。さらにダナーファーマーがん研究所は、そのHP\*中で、PS-341が

重症の白血病患者に対する臨床試験（phase II）において驚くべき効果を上げていると強調し、今年から始まっているphase IIIの臨床試験は2003年の初頭に終了するのではないかと述べている（2002年10月30日）。

一方、NIHでは扁平上皮がん患者に対するPS-341の臨床試験（phase I）が進められており、プロテアゾーム阻害剤ががんの新しい治療薬となり得るのか動向を注意する必要がある。

\*[www.dfci.harvard.edu/res/research/myeloma.asp](http://www.dfci.harvard.edu/res/research/myeloma.asp)

## 情報通信分野

### ①次世代不揮発性メモリに有望な新技術が開発される

2002年12月に開催された電子デバイスに関する国際会議IEDM2002において、Sharp Laboratories of America、シャープ、Houston大学は、新規な不揮発性メモリ（電源を切っても記憶を保持するメモリ）RRAM（Resistance Random Access Memory）を発表し、大きな注目を集めた。

現在、不揮発性メモリとして、フラッシュメモリが携帯機器、メモリカードなどに広く使われている。しかし、書き込み・消去が遅い、消費電力が大きい、書き換え回数が制限されるといった問題がある。これらを解決した次世代不揮発性メモリは、フラッシュメモリの代替だけでなく、DRAMの置き換えやシステムLSIのメモリとして使用することで、パソコンやデジタル家電の起動時間の短縮、低消費電力化等を実現するキー技術として注目されている。すでに、

MRAM（磁気メモリ）、FeRAM（強誘電体メモリ）、OUM（熱により結晶構造が変化する事に伴う抵抗変化を使うメモリ）など複数の技術が開発中である。

今回発表されたRRAMはCMR（Colossal Magnetoresistive）膜という薄膜に電圧をかけた時に大きな抵抗変化を起こす現象を利用している。元々CMR膜は、強磁界を印加すると非常に大きな磁気抵抗変化（磁気によって電気抵抗が変化する現象）を示すことが知られており、磁気ヘッドなどへの応用が考えられていた。その一種であるPrCaMnO系のCMR膜に電圧を印加すると、磁気が無くても1,700%程度の大きな抵抗変化が可逆的に起きることをHouston大学が見いだし、2000年に論文を発表していた（Appl. Phys. Lett. Vol. 76（2000）p2749）。今回のRRAMもPrCaMnO系のCMR膜<sup>①</sup>

を使用している。ただし、このCMR膜が電圧によりどのようなメカニズムで巨大な抵抗変化を示すかはまだ明確にはなっていない。

0.5  $\mu$ mプロセスで試作した64ビットのRRAMでは、+5V/−5V・100nsのパルスにより高抵抗/低抵抗状態が可逆的に実現した。これはフラッシュメモリと比較して電圧で1/2〜1/3、書き込み時間で1/10,000程度となる。また、電圧駆動のため、電流で発生する磁界を使って記録を書き込むMRAMと比較して低消費電力である。さらに抵抗変化率が1,000倍以上と大きいため多値化による大容量化も容易としている。

RRAMは他の次世代不揮発性メモリに比べても、1ビット当りの占有面積、消費電力、高速性等で同等か優れている。実用化まではまだ時間がかかると見られるが、今後の発展が期待される。

### 用語説明

#### ① PrCaMnO系のCMR膜

Pr（プラセオジウム）は希土類の元素。この膜は高温超伝導体と同様なペロスカイト系の結晶構造を持つ。

## 環境分野

### ① バイオマス推進の総合指針「バイオマス・ニッポン総合戦略」が策定される

2002年12月27日、バイオマス資源の総合的な有効利用に関する「バイオマス・ニッポン総合戦略」が閣議決定された。また、同時に「新エネルギー利用等の促進に関する基本方針」において、2010年までにバイオマス発電を約33万kW、同熱利用を約561万kL（原油換算）導入する目標も閣議決定された。

現在、国内でエネルギーや製品に活用できるバイオマス資源は、家畜排せつ物が年間約9,100万ト

ン、食品廃棄物が同約1,900万トンなど多くの発生量がある。しかしながら、これまでは、認知度が低い、広く・薄く存在し可搬性が低い、高効率の利用技術の開発がされていないなどの理由から、有効活用されていなかった。

近年、循環型社会形成、地球温暖化防止、農林漁業の再活性化、競争力のある産業の育成といった観点からバイオマスの有効活用的重要性を飛躍的に増大している。

本戦略では、バイオマス利活用技術の開発促進、地域の特性に応じた展開、循環型社会形成、地球温暖化防止を踏まえた全国的な利用推進の3つの視点から具体的な目標が示されており、関係5省（農林水産省、文部科学省、経済

産業省、国土交通省、環境省）の実施する具体的な行動計画等が示されている。

現在、バイオマスエネルギーまたは製品に変換する技術は、研究開発段階から実用化段階の技術まで様々である。こうした技術を実際に導入していくためには、バイオマスの収集・変換技術だけでなく、例えば、メタン発酵によって生じる廃水の処理技術といった、周辺技術の開発・実用化を同時に進めることが重要である。今後は、本戦略を基本にして、バイオマスの生産・収集から変換・利用に至る、各要素技術を一体とした技術開発、実用化の進展が期待される。

## ナノテク・材料分野

### ① シリコン発光素子で化合物半導体に匹敵する効率を達成

伊仏合弁の半導体大手メーカー、STマイクロエレクトロニクス<sup>①</sup>のカターニア研究所（伊シシリ島）は、シリコンをベースとする発光素子で化合物半導体に匹敵する効率を得る技術を開発したと発表した。この技術で得られる素子の量子効率（注入されたキャリア数に対して発生する光子数の割合）は約20%で、従来のシリコン発光素子の数十倍～100倍に

相当する。この技術を用いると、シリコン単一チップ上に光学機能と電子機能を集積化することが可能になる。

新技術にはSRO（Silicon Rich Oxide）という薄膜材料に、エルビウムやセリウムといった希土類元素をイオン注入する技術が組み合わせて用いられている。SROはシリコン系で可視光波長領域の発光を実現できる材料の一つとして以前から注目されてきた。シリコン酸化物中に直径1～2nmのシリコン微細結晶が存在する状態であり、シリコンが微細である。このためバルク状のシリコンより広い

禁制帯（発光を起こすために必要な励起エネルギー準位の不連続性）を持っており、発光材料として有利であると考えられてきた。同社の研究者らは、半導体プロセスでは一般的なPECVD（プラズマを用いた化学気相成膜法）装置を用いて、成膜条件を詰めることによりSRO膜中のシリコン微細結晶の濃度を制御できるようにした。また、希土類元素のイオン注入量を制御することで、SRO膜の発光効率をさらに高めることが可能になった。このイオン注入装置も市販の6インチウエハ用装置を希土類元素用に改造して用いており、このような汎用の装置から出発することで、新技術を集積化デバイス試作に容易に生かすことができた。

この応用例として、制御回路を電源系のスイッチングトランジス

### 用語説明

#### ① STマイクロエレクトロニクス

通信用デバイスを得意分野とし、現在、世界半導体メーカーの中で売上高第3位（日本の半導体メーカーより上位）に位置する企業。



タから電氣的に隔離したパワーコントロールデバイスを試作した。長期的には光ファイバ通信向けのデバイスも研究していくと発表さ

れており、今後、シリコン系の発光素子に共通の課題である応答速度等が改良されれば、応用範囲を広げることができると期待され

る。なお、発光波長域が異なる化合物半導体発光素子とは、応用分野の棲み分けが考えられる。

## エネルギー分野

### ①米国における高レベル放射性廃棄物処分研究の動向

米国では2002年7月9日、連邦議会上院がユッカマウンテンにおける高レベル放射性廃棄物処分プロジェクトに対するネバダ州知事からの拒否権発動を否決し、同プロジェクトは正式に承認された。これを受け7月23日にブッシュ大統領がユッカマウンテン法案に署名した<sup>①②</sup>。今後、2005年には建設承認、2010年から廃棄物搬入が目指される。

ユッカマウンテンサイトの立地点は標高1,300～1,600mの丘陵地帯にあり、処分場は標高1,050mレベルに計画されている。処分場が計画されている地層は亀裂性の凝灰岩で、地下水面からは175～365m上方のいわゆる不飽和帯（間隔が水や空気を満たされている岩石帯）となっている。さらに、降水の地中への浸透量は年間4.6mmという乾燥地帯である。

これまで地層処分に関する技術研究は、主に、ローレンス・バークレー国立研究所などのエネルギー省（DOE）傘下の国立研究所において実施されている<sup>③</sup>。

処分場から漏出した核種は、主に地下水流動によって生活圏に移動すると考えられるため、上記の

ような処分場の立地条件を前提に、不飽和亀裂性岩盤における地下水流動、核種移動のメカニズムの解明、廃棄物から生じる熱の地下水流動や化学的環境に与える影響に関する連成現象（熱、化学反応、流れ、応力・変形など複数のプロセスの相互作用が同時に進行）を考慮した数値モデリング、試験用坑道を用いた大規模加熱試験などが行われている。

なお、地層処分に関する日本との研究協力では、DOEは核燃料サイクル機構と国際共同研究協定を結んでおり、日本の深地層研究施設におけるサイト特性評価等の共同研究を行っている<sup>④</sup>。さらに、原子力発電環境整備機構（NUMO）とも2002年7月に二国間共同研究に署名している。ただし、ユッカマウンテンでの研究は不飽和帯における地下水や、核種の移行モデル、水理—熱—力学—化学の連成モデルなどであり、日本のように地下水位が浅く、飽和帯（全ての間隔が水で満たされている岩石帯）への処分が強いられる地盤状況においては、これに対応する技術開発やシステム設計が求められ

### 参考情報所在

- ① <http://www.ymp.gov/>
- ② <http://www.whitehouse.gov/news/releases/2002/07/20020723-2.html>
- ③ <http://www-esd.lbl.gov/NW/ymp.html>
- ④ <http://www.rw.doe.gov/program/int/int.htm>

よう。

### ②軽量で曲げられるフレキシブルなプラスチック太陽電池の研究開発が進展

軽量かつ曲げることが可能で、透明・カラフルな太陽電池の研究開発が進展している。12月20～21日、東京工業大学で開催された日本MRS学術シンポジウムにおいて、桐蔭横浜大学大学院工学研究科 宮坂力教授らの研究グループは、曲げることが可能な色素増感型太陽電池<sup>①</sup>で、従来の約1.8倍の変換効率である3.6%を達成したと発表した。当面の実用的な効率目標である5%に大きく近づいたことになる。

今回、発表された薄いプラスチックフィルム上に形成する色素増感型太陽電池は、軽量であることを最大の特徴としており、これに曲げられるという特徴が加わり、窓やカーテン、壁、携帯機器に貼り付けることが可能なフィルム型のフレキシブル素子としての可能性を拡大した。また、いわば生活密着型の太陽電池として、透明性・カラフル性も重視していくとしている。

今回のようなプラスチック基板を用いる色素増感型太陽電池では、軟化温度が150℃程度と低い

### 用語説明

#### ①色素増感型太陽電池

光エネルギーによって励起された色素が電子を放出し酸化チタン（半導体）に注入される。また電子を失った色素が電解液から電子を受け取ることで、電子授受のサイクルを形成し、起電力を得るタイプの太陽電池。

PETなどを支持体とする透明電極を用いるため、ガラス基板を用いる場合の400℃以上で焼成するという手法は使えず、2%程度の効率にとどまっていた。今回、静電的電着法を用いて、発電に必要な粒子間の電子伝導のネットワークを形成することにより、従来法に比べて変換効率が約1.8倍向上し

たものである。電着法は粒子の電気泳動を利用して製膜する方法で、密着性が良い、工程が極めて短時間であるなどの特長を持ち、電着膜は半径5mmの曲率においても剥離しない柔軟性を示す。色素増感した電着膜を光電極とし、対極にはカーボン薄膜を担持した導電性PETフィルムを使うこと

で、性能向上が図られた。

今後の研究開発課題は、電池の大面积化と耐久性の強化である。電解液に不揮発性で高温に耐える熔融塩を使うことが考えられており、既に高性能の熔融塩の開発にも着手している。

## 製造技術分野

### ①半導体デバイスの生産コスト低減をもたらすリソグラフィー補助プロセス

半導体デバイスの製造技術では2～3年毎に世代交代が進んでいる。配線幅は世代毎に25～30%ずつ縮小し、現在は100nm以下の微細加工技術が検討されるようになった。こうした微細化には、リソグラフィー技術（光照射によるパターン形成技術）の短波長化が最も有効な手段である。しかし、露光装置は1台10～15億円と半導体製造装置の中でも最も高価な装置であり、1世代毎に露光装置（光照射によるパターン形成装置）とその周辺機器を更新しては生産コストの大幅な増大が避けられない。このため、現行世代の技術

を延命する技術も重要視されている。

このほど、東京応化工業株式会社は、現行のリソグラフィー技術を利用しつつ、より微細なパターンを得るための補助手段を発表した。

リソグラフィー技術では、レジスト（感光性樹脂）をシリコンウエハ上に塗布し、マスクを通して露光を行ない、これを現像して所望のレジストパターンを得る。レジストパターンは熱処理や紫外線照射をかけて、より硬い状態にしないと、後のエッチングプロセスに耐えることができない。しかし、その状態にする際にレジストパターンが収縮するため、パターン間が所望の線幅より広がってしまう形状劣化が起これ、微細化を妨げる実際上のネックとなっている。今回、開発されたプロセス技術では、現像後のレジスト膜に水

溶性の収縮補助剤を塗布し熱処理をかけると、レジストパターン間に入った補助剤がより強く熱収縮し、レジストパターンの収縮を妨げる方向に引っ張り作用をかける。この補助剤は水溶性であるため、役目を終えた後は純水で取り除くことができ、形状劣化のない所望のレジストパターンが得られる。

本プロセスは、SAFIER（Shrink Assist Film for Enhanced Resolution）と呼ばれる。レジスト自身の化学成分には変更がない点が大きなポイントであり、ほぼすべてのレジスト種類において適用可能である。微細加工のみならず、高アスペクト比（縦横比）のパターン形成等でも効果を発揮すると考えられ、半導体デバイス以外のリソグラフィー技術にも寄与すると期待される。

.....

## 特集1

## RNA研究の動向

ライフサイエンス・医療ユニット 庄司真理子\*、茂木 伸一



## 1. はじめに

生物を構成する五大生体高分子は、DNA（デオキシリボ核酸）、RNA（リボ核酸）、タンパク質、糖質、脂質である（図表1）。

DNAは遺伝情報を貯蔵する物質であり、その遺伝情報をもとにRNAを経てタンパク質がつくられる。タンパク質とともに生命を維持するための重要な役割を果たす糖質や脂質は、タンパク質が酵素として働くことで二次的に生じるものである。つまり、生命の本質を理解するためには、DNAからタンパク質への遺伝情報の流れを解明することが特に重要なのである。

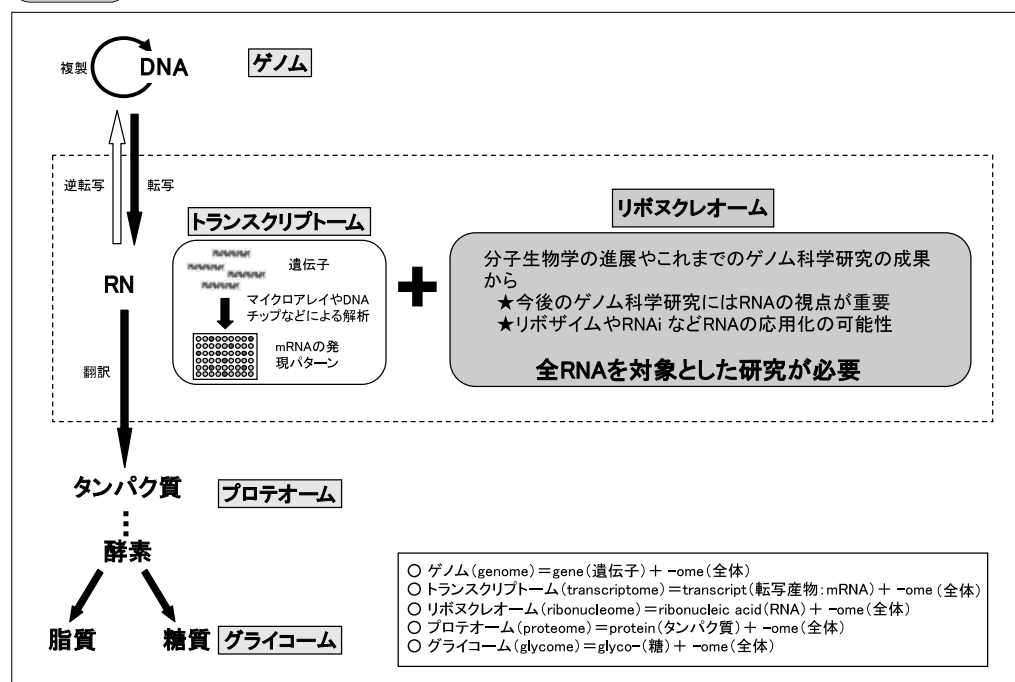
DNA上の遺伝情報は、メッセ

ンジャーRNA（mRNA）に読みとられ（転写）、それを鋳型にしてタンパク質が生合成される（翻訳）ことで生物の形質等に反映される。DNA上の全遺伝情報をゲノム（genome）と言い、ゲノムからタンパク質への遺伝情報の流れにしたがった一連の研究は、ゲノム科学研究などと呼ばれる。

ヒトの全DNA配列の解読を行うヒトゲノムプロジェクトの成果が2001年2月に公表されたことを受けて、次のターゲットとして現在最も注目されているのがタンパク質である。細胞内（外）の全タンパク質はプロテオーム（proteome）

と呼ばれ、全タンパク質の発現を網羅的に調べるのがプロテオーム解析である。プロテオーム解析にはいろいろな手法が用いられるが、一つにはタンパク質の鋳型であるmRNAの発現を網羅的に定量解析するトランスクリプトーム解析が行われている。タンパク質は生命現象の直接的な担い手であり、生体内の化学反応を進める酵素としての役割や生体を保持する組織の主要成分として働くだけでなく、産業応用にも直結する機能的な分子であることから、プロテオーム解析は世界的に熾烈な研究開発競争となっている。

図表1 遺伝情報伝達経路とRNA研究の位置づけ



（東京大学大学院新領域創成科学研究科渡辺公綱教授提供資料より科学技術動向研究センターにて作成）

このような遺伝情報の流れとは別に、細胞間の認識や相互作用に関わる働きをもつ糖質（糖鎖）についても注目が高まってきており、糖鎖を網羅的に解析しようというグライコーム（glycome）解析が最近注目を浴びてきている。

このような中、RNAはトランスクリプトーム解析として単にmRNA発現の量的変化が解析されてきたにすぎない。しかし近年の分子生物学の進展やこれまでのゲノム科学研究の成果から、RNAの機能の重要性が注目されてきている。例えば、トランスクリプトーム解析で得られたmRNAの発現パターンと実際のタンパク質の発

現パターンとは必ずしも一致しないことがこれまでに示されている。これは、遺伝情報伝達において、RNA自身の機能やRNAの転写後修飾などが重要な役割を担っていることを示している。また、mRNAなど翻訳系のRNA以外にも多数の機能的なRNAの存在が明らかとなってきたことや、酵素のような機能をもつリボザイム、二本鎖RNAを介した遺伝子発現抑制機構として最近注目を浴びているRNAiなどの進展により、RNAもタンパク質のような産業応用が期待されるようになってきている。

遺伝情報伝達の過程における

RNAの働きは非常に重要であり、今後のゲノム科学研究を進める上で、もっとRNAの視点を盛り込む必要がある。RNAが機能的な分子であり応用の可能性が強まってきていることも考え併せると、RNA自身を対象とした研究の必要性が今後さらに高まるだろう。

本稿では、RNA研究の概要を紹介するとともに、細胞内の全RNAを対象としたリボヌクレオーム研究の推進方策を検討する。なお、リボヌクレオーム（ribonucleome）とは、“ribonucleic acid (RNA)”と“-ome（全体）”の合成語であり、細胞内の全RNAを意味する。

## 2. DNAとRNAの違い

一般に、RNAはDNAを鋳型として塩基配列を写しとった分子であり、DNAと同様に、[塩基-糖-リン酸]が鎖状に結合したものである。DNAとRNAの化学構造を比較すると、塩基成分が、DNAではアデニン（A）、グアニン（G）、シトシン（C）、チミン（T）であるのに対し、RNAではチミンがウラシル（U）であることや、構成する糖がDNAではデオキシリボース、RNAではリボースであるという違いがある（図表2）。

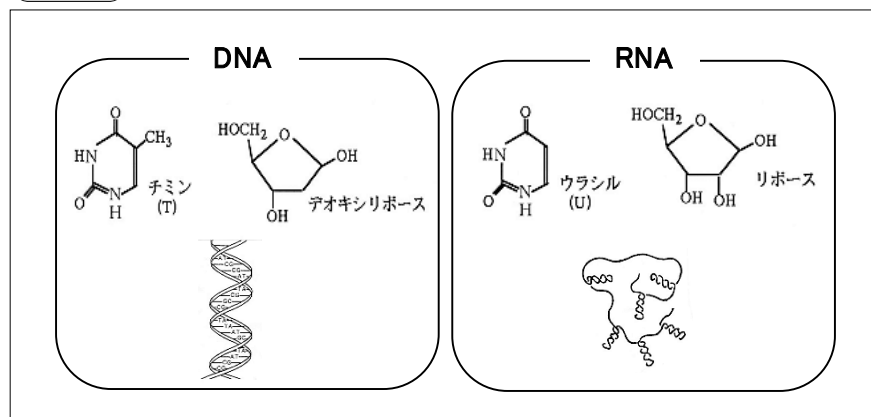
これらの違いにより、DNAとRNAの立体構造は大きく異なる。まず、DNAは二本の鎖が塩基間の水素結合により二重らせん構造を形成しているのに対し、RNAは本来一本鎖として合成されるが、自身で部分的に折り返して二本鎖構造を形成したりするため、一本鎖と二本鎖が入り交じった多様な構造をしている。また、RNAを構成するリボースはデオキシリボースと比べて水酸基（OH基）が一つ多いため、RNAは非常に化学反応性に富んでい

る。つまりRNAは分解されやすい不安定な分子であることから、DNAに比べて長鎖RNAを人工的に合成してつくることが難しく、研究材料としてのコストが高くなってしまう。

またもう一つ特徴的なことは、RNAにはさまざまな修飾塩基が付加されることである。よく知られているのは、真核生物のmRNAの5'末端にキャップ構造と呼ばれる修飾が付加される例で、これはmRNAの安定性、スプライシング、核から細胞質への輸送などで重要な機能をもつ。修飾塩基がRNAの機能と直接に結びつく例は最近数多く報告されており、修飾塩基も含めたRNAの研究手法の確立が必要である。

これらの主な特徴から、①修飾塩基を含むRNAの簡便な化学合成法の開発、②微量RNAの高効率単離法の開発、③質量分析法の高感度化、などがRNA研究を進めるにあたって必要と考えられる。RNAの研究手法はDNAやタンパク質に比べて著しく立ち後れている現状にあり、今後の技術開発が求められる。

図表2 DNAとRNAの構造上の違い



（東京大学大学院新領域創成科学研究科渡辺公綱教授提供資料）

### 3. RNA研究の歴史

これまでのRNA研究の経緯を図表3に示す。

RNAは1940年頃に同定されてから1970年頃までは、細胞内でDNAの遺伝情報をタンパク質に伝達する仲介役として、翻訳系のRNAの研究が進んだ。DNAの遺伝情報がコピーされたメッセンジャーRNA (mRNA)、アミノ酸を運ぶトランスファーRNA (tRNA)、リボソーム (タンパク質が合成される場) を構成するリボソームRNA (rRNA) などである。

1970年代後半にはイントロン (DNAにおいて遺伝情報を持たず mRNA をつくらない部分) が注目を集め、DNAからmRNAが合成される際、イントロンは切り出され遺伝情報をもつエキソンの部分のみがつながるというスプライシング機構に関する研究が盛んになった。

1970年以降、翻訳系以外の機能をもつRNAの存在が研究されるようになり、1980年代初頭、リボザイム (酵素のような機能をもつRNA) が発見されたことにより、RNA研究は大きく発展した。リボザイムの発見は、RNAのもつ動的機能 (触媒作用など積極的な反応) を広く認識させたことに加え

て、生体内反応はタンパク質である酵素が全て触媒しているというそれまでの常識を新たにした。またこの時期、現在DNA、RNA、タンパク質によって行なわれている遺伝的な生命活動は、もともとはRNAのみによってなされていたとするRNAワールド仮説 (Gilbert, 1986年) が提唱され、注目されるようになった。

1980年代以降、RNAやRNA結合タンパク質が減数分裂、発生・分化、神経系、病態などの高次生命現象にも深く関わっていることが明らかになってきた。また1980年代中頃、X線結晶解析やNMR (核磁気共鳴) 解析により生体高分子の立体構造を基盤としてその機能解明をめざす構造生物学がRNAにも導入された。この領域は近年急速に進展し、1998年には世界の数グループからタンパク質合成を行うリボソーム自体のX線結晶解析の成果が出はじめるなど、次々と研究成果が報告されてきている。

さらに、1990年、ランダムな配列をもったRNAから目的とする機能をもつRNAだけを選別・取得する試験管内人工分子進化法 (SELEX法) が開発されたことに

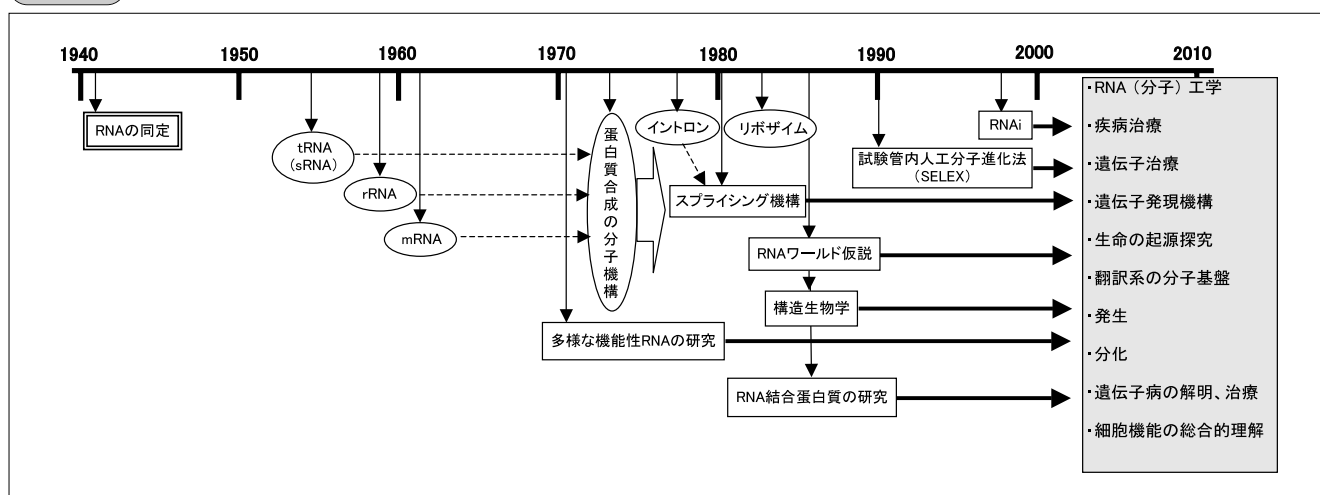
より、RNA分子工学という領域が生まれた。RNA分子工学は、特定の酵素やアミノ酸などの分子と結合するRNA (アプタマー) や人工リボザイム等を用いた創薬や疾病治療法の開発など、産業応用が期待されている。

また1998年には、外部から二本鎖RNAを細胞へ導入すると、その相同配列をもつmRNAが特異的に分解され遺伝子発現が抑制されるというRNAi (RNA interference) という現象が線虫で最初に見つかり、ポストゲノム時代の遺伝子機能解析法として一躍注目を集めた。2001年には、特定の短い二本鎖RNA (siRNA: small interfering RNA) を用いると、ヒトなどの哺乳動物でもこの方法が適用できることが判明した。これは、ヒト遺伝子の機能解析法 (knock down法) として非常に有用であり、すでに大規模な応用研究も始まっている。

このように、現在RNA研究の対象は非常に広範囲にわたってきている。

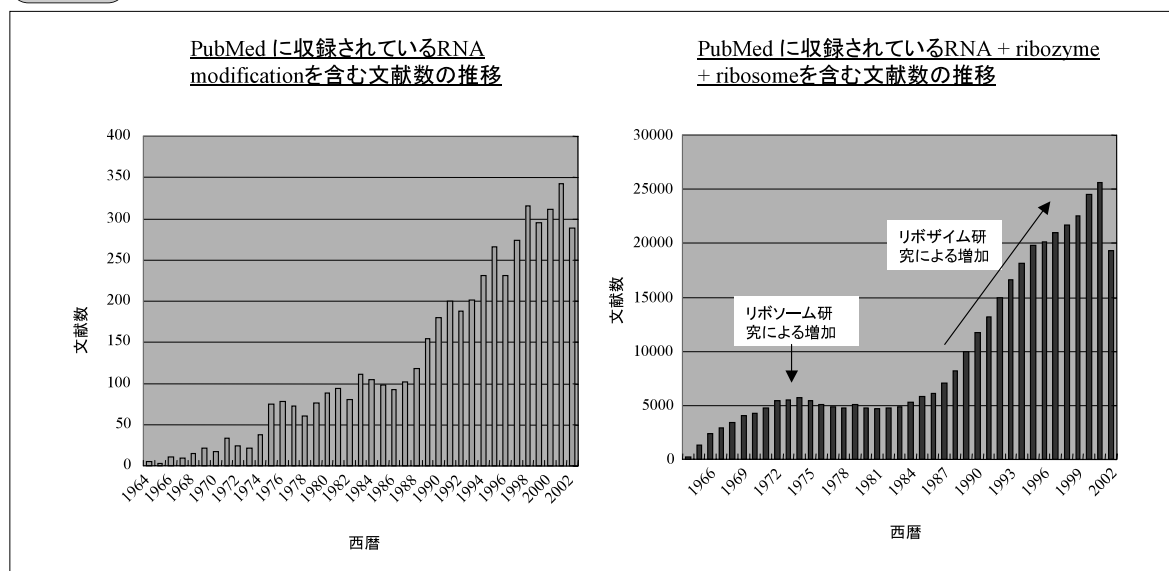
PubMed (米国国立医学図書館 (NLM) が作製する世界的な生物医学文献データベース MEDLINE のインターネット版) を用いて、

図表3 RNA研究の歴史



(東京大学大学院新領域創成科学研究科渡辺公綱教授提供資料より科学技術動向研究センターにて作成)

図表4 RNA研究に関連する論文数の推移



(東京大学大学院新領域創成科学研究科渡辺公綱教授提供資料)

RNA研究の動向を発表文献数の経年変化で見たものを図表4に示す。検索の指標として、「RNA modification (修飾)」および

「RNAあるいはリボザイムあるいはリボソーム」を用いて調べたところ、どちらも1980年代後半から文献数が急激に増加することが

分かった。この結果からも、RNA研究がこの10年間で非常に盛んになってきていることがうかがえる。

## 4. 国内外のRNA研究の動向

このようなRNA研究の進展に伴って、1996年の米国を中心とする国際RNA学会の発足、1999年の日本RNA学会の発足など、RNAを中心に据えた新たな動きも見られるようになってきた。これらの学会会員の平均年齢はおおよそ30代半ばであると言われているように、若手研究者の多い分野

としても特徴的である。

我が国では、1989年以降、科学研究費補助金(科研費)の重点領域研究(特定領域研究)によってRNAの基礎的な研究が継続的にサポートされてきたこともあり、基礎的なものを中心に数々の優れた成果を出してきている。

海外のRNA研究は、専ら米国

を中心に応用的な研究が盛んである。米国では、特にリボザイムやRNAiを中心にベンチャー企業が盛んに設立されている。中でもRNAiの応用的研究の進歩は著しく、2001年にヒトにも適用できるという報告が出て以降、これまでに関係するベンチャー企業が30あまりできたとされている。

## 5. 今後のRNA研究の方策(リボヌクレオームプロジェクト)

RNA研究はまさに発展途上の段階にあり、まだ未知の部分の多い領域である。したがって、今後戦略的にRNA研究を推進していくことで、我が国独自の研究を展開させていくことができると考えられる。

我が国のRNA研究者は、真核生物のmRNAにある修飾(キャップ構造)の発見やリボザイム研究の発端となるRNase P(tRNA分子を創出する酵素)の発見など、世界的にも評価の高い研究を行っ

てきており、質的にも高いポテンシャルを持っている。

東京大学大学院新領域創成科学研究科の渡辺公綱教授は以下のように述べている。「世界的にRNA関連の論文数が急増している中(図表4)、我が国発の論文数はこれに比例して増加しているわけではなく、また研究者の急増も見られない。つまり、我が国のポテンシャルは、限られたいくつかのグループによる質的な貢献によるものと考えられる。この背景の一つ

には、ゲノム科学研究が全体としてビックサイエンス化してきている中で、若手研究者の多くがゲノムやプロテオームなどに引き寄せられている傾向にあり、一方、RNA研究は従来どおり大学や国公立研究機関、企業などの各研究室がそれぞれの得意分野や利益の見込める分野のテーマを分散的に行なっているという状況がある。」

しかし、これまで述べてきたようなRNA研究の発展性や総合的なゲノム科学研究を進めていく上

でのRNA研究の必要性からも、我が国のRNA研究を今後さらに活性化させる必要がある。

RNA研究の活性化のためには、まず研究者の裾野を拡大することが重要であると考えられる。それには、科研費等の定常的な支援に加えて、プロジェクト研究などある程度大きな金額を拠出する研究支援体制が必要であろう。

ゲノムやプロテオームなどを対象とした網羅的・総合的研究は、ゲノムプロジェクトから始まった、我が国のライフサイエンス分野におけるトップダウン型の新しい研究体制である。このようなプロジェクト研究は、緊急必須の研究テーマを設定し、十分な研究費を使って若手研究者を含めた多様な研究者の活力を集結させるには大変有用な手法である。プロジェクト研究の遂行には、部分的な共同研究だけでは限界があり、求心力のある拠点（センターなど）が必要である。そこに集まった研究者が中心となって先導的な研究をやることで、国全体の研究レベルを上げることにつながると考えられるからである。

そこで、今後我が国において、細胞内の全RNAを対象とするリボヌクレオームプロジェクトを立

図表5 リボヌクレオームプロジェクトの概要

### 領域① RNA合成、構造解析

- ◆修飾塩基を含むRNA合成法の開発
- ◆微量RNAの高感度構造解析法の開発
- ◆リボソームなどRNA-タンパク質複合体の立体構造解析とそれに基づく抗生物質（翻訳阻害機能を持つ）の開発

### 領域② RNA機能解析

- ◆細胞内全RNAの網羅的機能解析とゲノムマッピング
- ◆バイオインフォマティクスを利用したRNAエディティングデータベース等の構築
- ◆人工リボザイムやアプタマーを活用したRNA生命起源説の科学的実証

### 領域③ 遺伝子機能解析と病態リボヌクレオーム

- ◆RNAiによるノックダウンマウスを利用した遺伝子機能解析
- ◆遺伝性疾患とRNA修飾変動の相関解析
- ◆RNAiやリボザイムを利用した遺伝子治療

（東京大学大学院新領域創成科学研究科渡辺公綱教授提供資料より科学技術動向研究センターにて作成）

ち上げることが有効である。世界的にみても、RNAに特化したリボヌクレオームプロジェクトを行っているところはまだほとんどなく、先駆的な取組となりうるだろう。プロジェクト課題としては、図表5に示したような3領域が想定される。

一つには、研究を遂行するにあたっての基盤技術となる簡易なRNA合成法の開発や立体構造解析の領域があげられる。

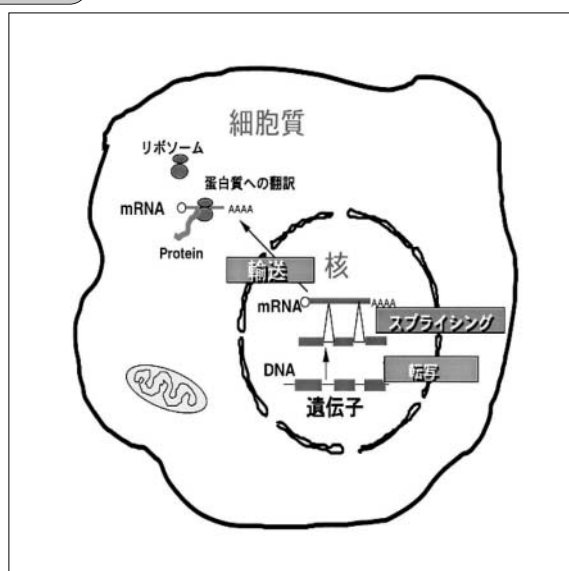
二つめには、RNA機能解析の

領域があげられる。ここでは、遺伝情報伝達過程におけるRNAの切断・加工・修飾や分解、細胞内での輸送や局在化、翻訳の読み枠の変更といったステップ（図表6）におけるRNAの機能を網羅的に解析することや、生命の起源がRNAにあったとするRNAワールド仮説（RNA生命起源説）を、人工リボザイムやアプタマー（特定の酵素やアミノ酸などの分子と結合するRNA）を利用して科学的に実証しようとする研究などが課題として考えられる。

三つめには、RNAを応用した遺伝子機能解析や病態に関するRNAを対象とする領域があげられる。米国でのベンチャー企業の興隆にも見られるように、RNAの産業応用への期待は非常に高まっており、例えば、RNAiによるノックダウンマウスを利用したヒト遺伝子の機能解析、リボザイムを用いたがんなどの遺伝子治療法の開発などが課題としてあげられる。

特にRNA研究においては、これまで研究開発の拠点がなかったことや研究者の裾野を拡大する必要性からは、求心力のあるセンターの整備が有効と考えられる。こ

図表6 細胞内におけるRNAを介した遺伝情報伝達



（東京大学大学院新領域創成科学研究科渡辺公綱教授提供資料）



うしたセンターによる先導的な取組と、従来からの科研費等による大学や国公立研究機関などでの分

散的な幅広い研究とを連携して進めていくことにより、今後、我が国のBNA研究が活発になってい

くことが期待される。

## 6. おわりに

近年、RNAは非常に機能的な分子であることが分かってきており、特に産業応用につながるリボザイムやRNAiなどの研究の進展により今後の発展性が大いに期待される。また、遺伝情報伝達経路におけるRNAの機能の重要性も認識されてきたことによって、総合的なゲノム科学研究を進める上でもRNA研究を充実させていく必要性が高まっている。RNA研究はまだ発展途上の段階であり、今後、RNA全体を対象とするリボヌクレオーム研究を戦略的に推進していくことで、我が国独自の研究が展開できると考えられる。

RNA研究の活性化のためには、まずRNA研究者の裾野を広げることが重要であり、それにはプロ

ジェクト型のリボヌクレオーム研究に取り組んでいくことが必要である。その遂行にあたっては、求心力のあるセンターなどを中心に、基盤的な技術開発、網羅的なRNA機能解析、産業応用を目指したRNA分子工学等を総合的に進めるような体制を整備することが望まれる。こうした先導的な取組と、科研費等による大学や国立研究機関などでの幅広い研究とを連携して進めていくことにより、我が国のRNA研究の質・量を高めるだけでなく、総合的なゲノム科学研究全体を推進していくことにもつながると期待される。

## 謝 辭

本稿は、科学技術政策研究所において2002年9月11日に行われた東京大学大学院新領域創成科学研究科の渡辺公綱教授による講演会「RNA研究の動向」をもとに、我々の調査を加えてまとめたものである。本稿をまとめるにあたって、渡辺教授にはご指導をいただくとともに関連資料を快くご提供いただきました。文末にはなりますが、ここに深甚な感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 志村令郎／渡辺公綱編集  
「RNA研究の最前線」シュプリ  
ンガー・フェアラーク東京、  
2000年



## 特集2

## バイオインフォマティクスの技術動向

\*

情報・通信ユニット 客員研究官 乃木 篤\*、香月祥太郎



## 1. はじめに

ヒトゲノム計画は国際協調のもと予想を上回るスピードで進展し、2000年6月にドラフトシーケンスが決定した。現在は完全解読に向けた最終作業の段階にある。日本の貢献は6~7%と予算規模に見合ったものであるが、戦略の欠如による出遅れが指摘されるなどの課題も残った。しかし、2002年8月の理化学研究所を中心とするマウス完全長cDNA<sup>(注)</sup>の解読終了とイネゲノムの解読、12月の日米共同によるホヤゲノム解読等はゲノム科学の新しい進展に大きな足跡を残した。これらヒトゲノムやマウスcDNAの配列が明らかになったことで、今後は配列の解析から網羅的、体系的な機能の解析へと焦点が移っていくとみられる。日本はイネゲノムや完全長cDNAライブラリなど基盤技術

での強みがあり、学術的にも応用分野でも世界をリードするチャンスは十分にある。

近年、解析装置の高速化・自動化により、産出される実験データの量は膨大になっており、情報技術の役割はより一層大きなものとなりつつある。従来のデータ処理の効率化だけでなく、ゲノムを活用した網羅的な解析の複雑さに対応するための数学や情報科学の知識が必要となる。バイオインフォマティクスはこのような課題に体系的に取り組むために生物科学と情報科学の境界に生まれた新しい学問分野である。

本誌2001年12月の特集においてバイオインフォマティクスをとりあげ、その動向を生命科学の観点から概観した。本稿ではその後の動向を含めてゲノムや生命をシ

ステム的に理解するための方法論および今日的課題である人材育成策について述べる。

(注) 完全長cDNA：cDNAとは、ゲノムDNAの中から不要な配列を除き、タンパク質をコードする配列のみに整理された遺伝情報物質であるmRNA（メッセンジャーRNA）を鋳型にして作られたDNAのこと。完全長cDNAは、断片cDNAと異なり、タンパク質を合成するための設計情報をすべて有しているため、タンパク質を合成することができる。この完全長cDNAを効率的に合成するためには、非常に高い技術を必要とし、わが国が世界に先んじている。

## 2. バイオインフォマティクスにおける情報科学的手法

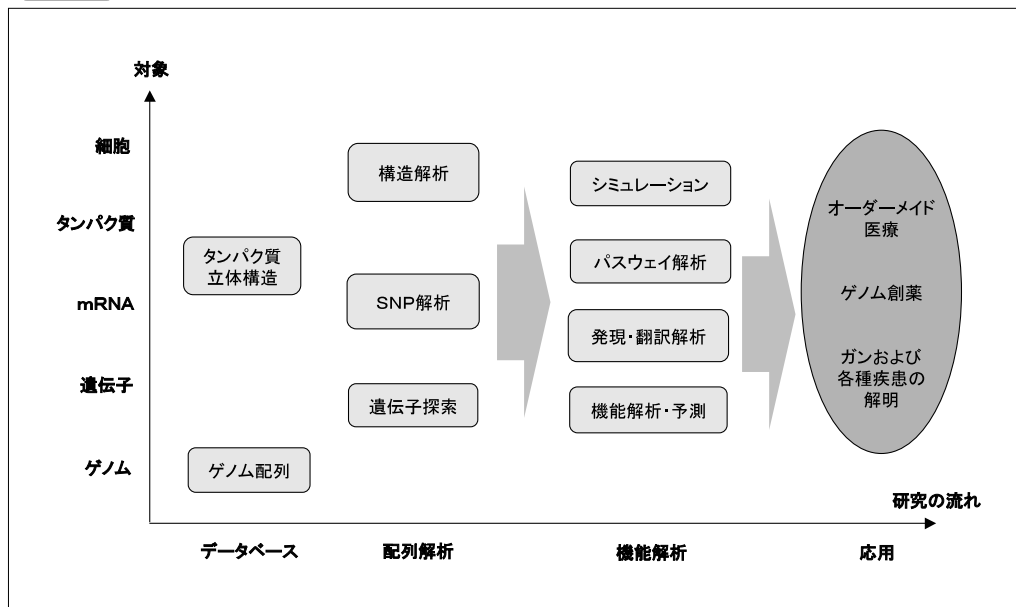
ゲノム研究における諸問題を情報科学的にとらえて定式化を行うと、その多くが現在の計算機の処理能力をはるかに超える非常に困難な問題となる。これはゲノム配列が非常に長いこと、および解析の対象とする問題の性質が組み合わさることによる。したがって、近似解法や発見的手法が必要となる。そのための実用的アルゴリズムの開発はバイオインフォマティクスの主要な研究分野であ

り、その成果はゲノム配列の決定に大きく貢献してきた。米セラ・ジェノミクス社が用いた全ゲノムショットガン法という配列決定手法は、数千万個のランダムな配列断片をジグソーパズルのようにつなぎあわせるものであり、当初は手法そのものが疑問視されていた。しかし、同社は最高性能の計算機と独自のアルゴリズムを駆使して驚異的な速さで配列決定を成し遂げ、情報技術の威力と有効

性を強く印象付けた。

近似解法は必ずしも最適解を導くものではないため、解析結果の生物学的な評価とそれに基づくアルゴリズムやパラメータの改良が必要となる。バイオインフォマティクスの特徴は、実験で確かめるべき膨大な探索空間を絞り、体系的かつ網羅的な解析を可能にし、個々の遺伝子の解析では見えてこなかった生命現象の全体像を明らかにできる点にあるといえる。

図表1 バイオインフォマティクス研究の流れ



(科学技術動向センターで作成)

これまでバイオインフォマティクスは、ゲノムデータベースの構築やデータ解析のためのツール開発とその利用技術が中心であった。今後、ゲノム研究において遺伝子発見や機能予測などで、より高度な情報処理能力が活用されるようになってくる。ゲノム解読からスタートした研究は、図表1に示すとおり、DNAから遺伝子、タンパク質、さらには個体へと対象の複雑性・多様性は増大し、解析レベルは配列から機能、作用へと、研究の焦点が移っていくことが明らかである。バイオインフォマティクスにおいてもこの流れに

沿った研究開発を行う必要がある。

## 2-1

### データベース

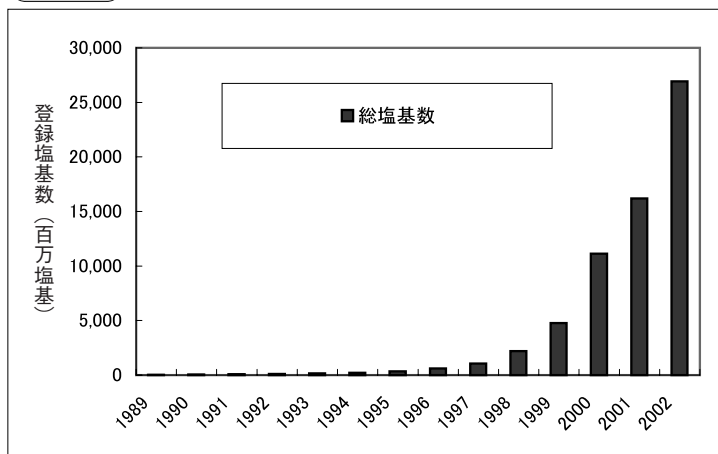
ゲノム研究によって生み出される大量のデータの多くは、公共のデータベースに登録されインターネット上で公開されている。これらのデータはバイオインフォマティクスのあらゆる研究の基点となる研究基盤として位置づけられる。公共のゲノムデータベース（GenBank（米）、EMBL（欧）、DDBJ（日））に登録されるDNA配列データは指数的に成長してい

る（図表2）。これまでのデータベースはDNA配列やタンパク質構造データなどの一次データの集積であったが、ゲノムプロジェクトの進展とともに多様化が進み、一塩基多型（SNP）や変異の情報、遺伝子やタンパク質の相互作用の情報など、従来とは異なる性質をもったデータがとりこまれるようになってきた。これらの多様なデータを駆使した解析を行う上で、データベースや情報技術の高度化がますます必要となっている。

#### (1) データベースの注釈づけ

多様なデータから新たな知見を発見するための一連のプロセスをデータマイニングと呼び、バイオインフォマティクスにおける重要な技術である。しかし、実験によって得られたデータが、データベースに登録されただけの状態に放置され、データマイニング技術を有効に適用できないことが問題となっている。そこで研究に使えるように解釈情報を付与する必要がある。これをアノテーション（注釈付け）と呼ぶ。現在アノテーションはコンピュータによる自動化が進められている。しかしコンピュータだけでは最適なアノテーシ

図表2 登録塩基数の推移



(日本DNAデータバンクホームページをもとに科学技術動向センターで作成)

ョンが得られないので、人による確認作業が必要となる。理化学研究所で決定されたマウス完全長cDNA配列のアノテーションに関する会議が2000年8月に理化学研究所（筑波）において開かれ、各国の研究者による2週間にわたる白熱した議論の中でアノテーション作業が行われた。アノテーションには個人の解釈を超えた、各機関の研究者による確認の協調作業が不可欠となる。

## (2) 概念と語彙の統合

遺伝子やタンパク質は、それを対象とする研究の過程で慣習的に付けられた名前をもっている。したがって異なる研究分野において同じタンパク質がいくつもの名前を持つこともあり、統合が求められている。またヒトをはじめとするモデル生物の相次ぐ解読で、生物界全体を対象とする研究が増えている。これまでモデル生物（大腸菌、酵母、マウスなど）ごとにデータベースが作られてきたが、使われる用語や分子の呼び名に統一の基準がなく利用上の非効率が問題とされてきた。

このような問題を解決するため、語彙の不統一を整理し、体系的に記述する試みがはじまっており、オントロジーと呼ばれている。オントロジーとは、概念に首尾一貫した用語と定義をあたえることである。遺伝子を対象とした遺伝子オントロジー、分子や細胞の相互作用を対象としたインタラクションオントロジー、シグナル伝達系を対象としたシグナルオントロジーなど、研究分野ごとにオントロジーの構築が進められている。このような語彙の統合と体系的分類が進めば、データベース間の相互運用性が高まり、異種のデータベースが互いに参照しあえるようになるというメリットがある。

## 2 - 2

### ホモロジー解析

遺伝子やタンパク質の機能を、生物種間のアミノ酸配列の類似性に基づいて調べる手法をホモロジー解析と呼ぶ。ホモロジー解析は遺伝子およびタンパク質の機能を調べる有力な手段となる。タンパク質は、近縁の生物種ほど構造的、機能的に類似している。したがって、類似した配列の遺伝子が別の生物種に見つかり、その機能が同定されていれば、当該の遺伝子の機能的性質を予測する手がかりとなる。

ホモロジー解析において、対象がゲノム配列のように非常に長い配列の場合、配列が一致する領域を高速に見つけることが重要となる。このための代表的な解析ソフトウェアとしてFASTA（Fast Alignment）およびBLAST（Basic Local Alignment Search Tool）がある。FASTAとBLASTを比べるとBLASTのほうが処理速度は速いため、より一般的に使われている。FASTAは検索感度に優れているので、より詳しい解析に用いられる。

BLASTやFASTAを用いても大規模なゲノムデータベースの検索には時間がかかる。この対策としては検索処理の並列化が有効である。並列化には、SMP（Symmetric MultiProcessor）と呼ばれるマルチプロセッサ方式、PCクラスタ、グリッドなどの方式が考えられる。マルチプロセッサ方式は一つのコンピュータシステム上に複数のCPUを搭載して処理能力を高める方式である。またPCクラスタは通常のパソコンを複数台ネットワーク接続することにより低コストで並列計算機を実現するものである。広く使われているNCBI（National Center for Biotechnology Information：米国の統合生物

情報データベース）提供のBLASTプログラムではマルチプロセッサ型の並列計算に対応しているが、マルチプロセッサ方式はハードウェアが高価であるという難点がある。そこで、低コストなPCクラスタに対応したBLASTが実用化されている。

また、グリッドに代表されるような共用計算環境の利用も考えられる。グリッドは近年、注目を集めている情報技術の一つである。国内でのバイオ関連グリッドの動きとして、大阪大学のバイオグリッドプロジェクトや並列生物情報処理イニシアティブ（IPAB）のOBIGrid（後述）などがある。OBIGridでは、バイオインフォマティクスで必要となる最新データベースやアプリケーションが利用できる環境が提供される。これらを利用すれば、個々の研究室では高価な計算設備を持つ必要はなくなる。こうした国内での取り組みについてはより一層の充実を図っていく必要がある。

## 2 - 3

### タンパク質構造解析

タンパク質はゲノム情報に従って生体内で合成される最終の産物であり、生命活動の基本的な機能分子である。タンパク質のアミノ酸配列と立体構造の関係を理解することはバイオインフォマティクスの大きな目標の一つである。ここ数年の立体構造のデータ数は著しい伸びを示しており、10年前の10倍以上となっている。

アミノ酸の配列からタンパク質の立体構造は一意に決定される。すなわち、原理的には配列のみから立体構造の予測が可能である。タンパク質が細胞内で合成されると、数ミリ秒から数秒の時間をかけてエネルギー的に最も安定な立体構造に折りたたまれる。この過程をフォールディングという。し

かしタンパク質の立体構造を分子動力学から予測しようとする、膨大な計算量が必要となるため十分な精度が得られていない。

実用的な構造予測の手法にホモロジーモデリング法がある。これは、配列が類似しているタンパク質は構造も似ているという性質を利用するものである。構造が既知のタンパク質と配列レベルで30%以上一致しているとき、その構造を部分的に修正することで、求めるタンパク質立体構造を予測することができる。

タンパク質の構造予測が可能になった今日、タンパク質研究の焦点は機能解析に移りつつある。機能解析によるタンパク質の機能特性の予測は創薬開発につながる重要なものである。ここでのバイオインフォマティクスの役割は極めて大きい。

## 2 - 4

### 遺伝子ネットワーク

ゲノムの全配列やタンパク質の立体構造がわかったとしても生命を理解したことにはならない。次に重要となるのは、どの遺伝子がどのような相互作用を行うかという遺伝子ネットワークの解明である。そのためには、これまでに蓄積された生命科学の膨大な知識を相互作用という観点から体系化し、計算機で扱えるようにしていくことが必要となる。バイオインフォマティクスの新たな適用領域として注目される。

ゲノムの機能解析において、細胞中で発現している全遺伝子をトランススクリプトーム、また遺伝子から生成される全タンパク質をプロテオームという。機能未知の遺伝子が、いつ、どのように発現するかを知ることは、その機能を考える大きな手がかりとなる。

プロテオーム解析で得られたデ

ータは、他の研究者にとっても有用な情報となりうる。スイスバイオインフォマティクス研究所では実験試料に含まれるタンパク質の分析結果である電気泳動ゲル画像のデータベース化を推進している。しかしプロテオーム情報には特許性があり、創薬など産業利用にも直結するため、公共利用は制限される方向にある。したがって国内でのプロテオーム関連データベースの整備が急がれる。

さらに細胞をゲノムにコードされた遺伝子で作るダイナミックなシステムとして理解することが、バイオインフォマティクスの主要な研究課題となりつつある。京都大学のKEGG (Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes) システムでは、遺伝子ネットワークの研究成果をデータベースとして公開している。遺伝子ネットワークの解明は遺伝子機能の記述を中心とした従来の生物研究の方法論では不十分であり、情報科学との融合が必須となっている。

## 3. 情報技術からみたバイオインフォマティクスの課題

バイオインフォマティクスで使われる解析ツール（ソフトウェア）は大半が海外技術を導入したものに依存しており、ソースコードが公開されてないもの、インターネット上のサービスのみで提供されるものなど、機能がブラックボックスとなっている。また商用では、海外のソフトウェアを組み合わせ提供されるものがほとんどである。

図表3は米国の大学の標準的な教科書で紹介されている、評価の定まったゲノム配列解析ソフトウェアを示した。これを見るとわかるとおり、米国以外の国で開発されたソフトウェアは極端に少ない。タンパク質立体構造予測や遺伝子アノテーションなどアプリケーションソフトにおいて国産の優

れたソフトウェアがいくつか存在するものの、図表3に示したような基盤分野で広く使われるソフトウェアはなかなかでてこない。この理由として、複数の研究者へのヒアリングから以下のような意見が得られた。

- バイオインフォマティクス研究者の数は、我が国と米国とで大きな開きがある。米国では研究動向の変化に応じて研究者の転身、転職が迅速に行われるなど人材の流動性があり、バイオインフォマティクスの研究者が短期間に確保された。バイオインフォマティクス研究者の育成が喫緊の課題である。
- 情報系と生物系の研究領域の

融合が進んでいない。BLASTの開発者はもともと数学を専門としていた。異なる分野の研究者同士が共同で研究できる環境が必要である。

- バイオインフォマティクスに必要なソフトウェアが研究レベルで動くプログラムにとどまっておらず流通しない。また、独創性のあるアルゴリズムが論文になった時点で、その仕事に区切りをつけてしまい、ソフトウェア開発にまでつながらないケースがある。また、ソフトウェアの流通のためには、マニュアルやインストールツール、配布メディアなどのパッケージ化が必要となるが個々の研究者がそこまでの労力をかける余裕がない。

図表3 主なゲノム配列解析ソフトウェア

ソフトウェア	考案者、作者	特徴
ホモロジー検索		
FASTA	Pearson 1988 (米・Virginia大)	検出感度はBLASTより優れている。
BLAST	Altschul 1990 (米・NCBI)	FASTAよりも高速。現在もっともよく使われている。
PSI-BLAST	Altschul 1997 (米)	タンパク質ファミリーを見つけるための対話版BLAST。SSEARCHよりも検出感度は高い。
SEG	Wootton, Federhen 1993 (米)	低複雑度領域や反復配列を除いて類似性の比較精度を高める。
SSEARCH	Pearson 1991 (米)	動的計画法により最適なアラインメントを求める。非常に遅い。
Bayes block aligner	Zhu 1998 (米)	ベイズ統計を利用するものでSSEARCHよりも遅いが、より遠縁の配列を見つけることができる。
PROBE	Neuwald 1997 (米)	PSI-BLASTと同種の機能をもつ。ベイズ統計を用いて非対話的に最も有意な配列集合をみつける。
多重配列比較 (複数の配列の比較)		
ClustalW	Higgins, Sharp 1988 (英)	累進法により複数の配列の整列配置を求める。多重配列アラインメントでは最もよく使われている。
PILEUP	Fen, Doolittle 1987 (米)	累進法により複数の配列の整列配置を求める。配列の比較にはニードルマン・ヴァンシュ法を用いる。
MSA	Lipman 1989 (米)	多次元動的計画法により最適なアラインメントを求める。
PRRP	後藤 1996 (日・産総研CBRC)	系統樹を求めて反復学習によりアラインメントを改善する。
SAGA	Notredame, Higgins (仏)	遺伝的アルゴリズムによりスコアの高いものを選ぶ。
HMMER	Eddy 1998 (米)	隠れマルコフモデルを用いる。
プロファイル検索 (特徴的なパターンの検索)		
ProfileSearch	Gribskov 1996 (米)	配列パターン (モチーフ) の検索を行う。
MAST	Bailey, Gribskov 1997 (米)	ギャップを含まない配列ブロックに合致する配列を検索する。
遺伝子発見		
RepeatMasker	Smit (米・Washington大)	反復配列を検出して取り除き、遺伝子を発見しやすくする。
TWINSKAN	Korf (米・Washington大)	異なる生物種のゲノムを比較し、配列の保存領域から遺伝子を発見する。配列比較法とab initio法のハイブリッド法。

(参考文献<sup>1)</sup>をもとに科学技術動向センターで作成)

これらの問題の解決には、バイオインフォマティクスの人材育成

のための環境整備やソフトウェアの実用性を評価し流通させる体制の確立が有効と考えられる。これ

らを国として支援できる枠組みを検討すべきであろう。

## 4. 国内におけるバイオインフォマティクスの事例

これまで述べたように国内でのバイオインフォマティクス研究の遅れが指摘される一方で、一部には欧米に並ぶレベルの研究事例も出てきている。

### 4-1

#### タンパク質立体構造予測プログラム

現在、タンパク質の立体構造予測は創薬の観点から注目されている。北里大学の梅山教授らが開発したFAMSはタンパク質構造予測

の国際コンテストであるCASP (the Critical Assessment of Techniques for Protein Structure Prediction) の2000年の大会で優秀な成績を収めた。この分野では米国製をはじめとする海外のプログラムが広く使われているが、FAMSはそれに勝る好成績を修めた。他のプログラムが部分構造から全体を構築するボトムアップアプローチであるのに対し、FAMSはまずおおまかな全体構造をとらえた後、部分構造を予測する。これは人間が立体構造を認識する際にまず全体

に着目することをアルゴリズムに取り入れたものであるという。こうした世界レベルのコンテストに参加することは研究開発の促進につながるものと期待される。

### 4-2

#### バイオグリッド

近年、注目を集めている情報技術の一つにグリッドがある。グリッドとは電気の送電網のことで、「電気のようにコンセントにつなぐだけで好きなだけの計算パワー

やディスクを使うことができるようなコンピュータシステム」をイメージしている（科学技術動向2002年9月号「グリッド技術の動向」参照）。

バイオグリッドは、バイオインフォマティクスに必要な設計パスをグリッド技術で共有しようというものである。

OBIGrid（Open Bioinformatics Grid）は、文科省科研特定領域研究ゲノム情報科学と並列情報処理イニシアティブ（IPAB）が母体となり、グリッドに接続するだけで最新データベースやアプリケーションが利用できる環境の構築を目指している。OBIGridは、ゲノム解析の拠点となりうる可能性を持っており、まずバイオインフォ

マティクスへの研究者の参入障壁を下げるができる。即ち、バイオインフォマティクスで必要となる様々なデータベースやアプリケーションの環境を自力では揃えられない研究者を多く引き寄せる効果が期待できる。またグリッドは実験データ開示の場として機能しうるものであり、LAN環境と同様の手軽さでファイルにアクセスできるため、そのままでは死蔵されてしまうような実験データから新たな発見をもたらすことが期待される。

#### 4 - 3

### 産学連携による商用化

バイオインフォマティクス研究の成果として公的資金により開発されたソフトウェアの商用化による市場への流通の動きもある。理化学研究所のFANTOM（Functional Annotation of Mouse）プロジェクトで開発されたcDNA機能アノテーションシステムが2002年に製品化された。公的研究機関と企業との共同研究プロジェクトの成果が汎用的に利用可能なパッケージ化につながった例として注目される。

これらの事例は日本のバイオインフォマティクス研究の可能性を示すものとして注目される。

## 5. 人材育成の取り組み

#### 5 - 1

### バイオインフォマティクス研究に求められる人材

国内のバイオインフォマティクス研究が遅れた原因として、複数の研究者へのヒアリングによれば、人材の不足を指摘する声が圧倒的に多い。ゲノムやDNA解析からタンパク質の構造・機能解析までを強力に推進する技術としてバイオインフォマティクスは不可欠であるが、情報系技術と生物系技術の融合領域に属するだけに、わが国では人材の育成が大きな課題である。二つの言葉（生物・医科学系と情報系）を話せる人材が必要とされている。また、学部・学科を超えた横のコミュニケーションや交流の不足も原因として指摘されている。理化学研究所のFANTOMプロジェクトでは、生物系、医科学系、情報系の3分野の研究者がチームを組んで密接な協業の中で研究を進めていくこと

で大きな成果が得られたという。情報系と生物系の研究者がただデータのやりとりだけで役割を区切ってしまうと、実験研究と解析研究の双方の研究成果を互いに十分に生かすことが難しくなる。

求められる情報系人材としては、大量のデータを扱うことから、DB構造やプログラミングに長けている人が望ましい。また生物系人材としては、高度なIT知識までは必須ではないが、解析プログラムの仕組みを理解して使いこなすことができ、実験上の要求に応じてプログラムを改変したりできる能力を習得していることが望ましい。

人材育成の方針としては、豊富な人材を抱えるIT分野から生物系への参入を促すことが人材の量的な確保において有効であると考えられる。しかしながら、すぐれたバイオインフォマティクス研究には深い生物学的・医学的知識が欠かせないことから、生物・医学系の研究者が情報技術を学ぶこと

によってバイオインフォマティクスの研究に進むという流れを作っていくことも、研究人材の質的な確保には欠かせないと考えられる。

欧米、特に米国では情報科学を修得した研究者が新たな研究分野としてゲノム科学等に進出し、遺伝子研究者らと協業することによってすぐれたバイオインフォマティクスを確立してきた。そういう環境のもとでは、論理的・数学的に裏付けられた解析手法が遺伝子発現やタンパク質の構造・機能実験に適用され、試行錯誤を経て実用的解析技術として確立されてきている。

#### 5 - 2

### 人材育成のための方策

学術的にもバイオインフォマティクスは新しい領域であり、大きな期待が寄せられている。一方でゲノム科学研究やタンパク質研究の進歩が急激なため、民間を含む多くの研究機関等で早急な人材の

供給が求められている。そのためにはバイオインフォマティクス人材の育成が急務であり、以下のような環境を整備することが有効である。

- (1) 情報科学系と生物科学・医学系の大学院生に対して両分野の学問を学ぶ選択肢を与え、融合領域の研究に取り組めるようにすること。
- (2) 情報系の研究者・技術者と生物系医科学系の研究者が共同で研究できる環境をつくること。これによりDNAやタンパク質の実験研究の進捗に応じて必要な解析アルゴリズムを案出しコンピュータで解析するなどの、実験とバイオインフォマティクスが一体化した研究が進み、技術の開発と実地的な人材の育成が図られる。
- (3) バイオインフォマティクスで用いられる各種のコンピュータ解析アルゴリズムやソフトウェアツールを考案した人の

成果と技術貢献を評価する仕組みを作ること。

バイオインフォマティクスの人材育成については、上述の環境条件を整備するためには大学院のカリキュラムの弾力的運用や変更が有効であろう。また、既存の専門分野の研究者と同様のキャリアパスが得られるよう教官のポストを設置し、その枠組みの中で研究成果の評価や人材配置を行う必要がある。さらに民間も参画できるような研究体制の整備も望まれる。これらの施策によって関連学術分野からの研究者の参入も期待できる。特に、数学、統計学、数理工学などの研究分野はバイオインフォマティクスの理論的基盤の発展に大きく貢献するものである。上記条件を満たす体制に対して国の資金的な支援も必要であろう。

2001年に慶応大学は「IT主導型バイオサイエンス」を目指して山形県鶴岡市に先端生命科学研究所を設立した。ここでは情報系や

生物系の教授や若手研究者が学生とともに互いの学問分野を学びながら両分野の融合研究が行えるような環境が整備されている。また、2002年に大阪大学に新設された生命機能研究科は医学・生命科学系、生物工学、生物学、物理学など大阪大学の生命科学関連分野の研究室を結集して作られた学際的な研究科である。

また、国においては、平成13年度から科学技術振興調整費によりバイオインフォマティクス分野においてプロフェッショナルを早期に育成する人材養成ユニットを設置している。平成14年度までに東京大学、京都大学、産業技術研究所、慶應義塾大学、奈良先端技術大学院大学に計6ユニット設置され、各人材養成ユニットにおいて融合的な人材養成が行われている。このような動きが他の大学や研究機関にも広がっていくことによって、バイオインフォマティクスのような学際研究の活性化が促進されるものと期待される。

## 6. まとめ

バイオインフォマティクスの活躍の場となるゲノム研究はスピードが要求される分野であり、各国で研究資源の急速な投入が行われている。我が国においてもゲノム研究への投資は増大しているが、創薬やオーダーメイド医療に向けてますます発展していくであろうゲノム研究を支えるバイオインフォマティクス人材の育成はまだ十分ではない。

ゲノムやタンパク質研究は比較的単純な配列解析の段階から、機能解析、さらに応用へと新しい段階へ動きつつある。これに従いバイオインフォマティクスへの要求もより高度になり、また研究における重要性も高くなっていくと思われる。この要求を満たすために

は情報系・生物系双方の学術的・技術的知見を備えた人材の育成を急がなくてはならない。5章に述べたようにその動きはすでに始まっているが、日本全体で見た場合には十分とはいえないであろう。

人材育成は、短期的には情報系研究者・技術者と生物・医学系研究者との協業を促進し、情報系、生物・医学系双方が個々の分野の知識・ノウハウを共有しながら研究する環境を整備することが有効であると考えられる。現在進行中のバイオインフォマティクス関連のプロジェクトにおいてもこの観点を重視するとともに、情報系研究者・技術者と生物・医学系研究者の相互参入を促していくべきである。

## 謝 辞

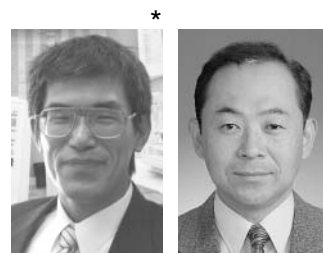
本稿の執筆にあたり、理化学研究所ゲノム科学総合研究センターの林崎良英プロジェクトディレクター、岡崎康司チームリーダーおよび小長谷明彦プロジェクトディレクターの各氏に多くの情報と資料のご提供を頂いた。深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) David W. Mount 著、岡崎 康司／坊農 秀雄 監訳、「バイオインフォマティクス」、メディカル・サイエンス・インターナショナル (2002)



## 特集③

循環型社会の構築を目指した  
廃棄物処理の技術開発と研究動向環境・エネルギーユニット 根本 正博\*  
客員研究官 吉川 邦夫

## 1. はじめに

家庭や工場等から大量に排出される廃棄物の処理が大きく社会問題化するに伴って、日本の経済成長を支えてきている大量生産・大量消費の経済活動は、省資源・省エネルギーを目指して廃棄物を有用な資源として再生利用する方向に大きく転換し始めている。政府は、容器包装、家電4品目、建築廃材、食品、自動車についてのリサイクルを義務付けた法令を順次施行するとともに、第2期科学技術基本計画で「循環型社会構築のための研究」を取り上げている。これを受けて、総合科学技術会議は、分野別推進戦略の環境分野において「ゴミゼロ型・資源循環型技術研究」を重点化の柱の一つとして盛り込み、社会基盤分野においても科学技術の進展で生ずる有害危険物質への対策に言及している。

さらに、経済財政諮問会議の循環型経済社会に関する専門調査会においても、ごみを資源・エネルギーに活用する方策の検討を進めている。

工場でバージン原料から製品を作り出す物流量（動脈流）と、工場や家庭での不要品を再資源化して工場向けの原料にする物流量（静脈流）を同水準として、最終的に廃棄物ゼロとなる「ゼロエミッションの実現」について、産業官は環境負荷低減の有力な方策として様々な研究・技術開発に取り組んでいる。特に、産業界には、リサイクル関連法の施行に伴って環境ビジネスとして有望な市場が創生されるとみる考えがあり、数多くの企業によって環境対策のための技術が相次いで開発されている。しかしながら、いまだ静脈流

を支える産業（静脈産業）を支える技術は確立しているとはいえない状況にある。このため、静脈産業による一般廃棄物（約5100万トン／年）および産業廃棄物（約40000万トン／年）の再資源化はごく一部にとどまっており、さらに産業廃棄物最終処分場新規施設数が平成11年以降激減していることなどから、危急的速やかなリサイクル技術の確立が求められている。

本稿では、リサイクル関連法における廃棄物の分類を機軸として、廃棄物処理の研究・技術開発と事業化への取り組みの現状を分析する。さらに、多様性に富んだ循環型社会を構築するに当たって、取り組むべき研究・技術開発の課題について言及する。

## 2. 循環型社会の形成を推進する法的枠組み

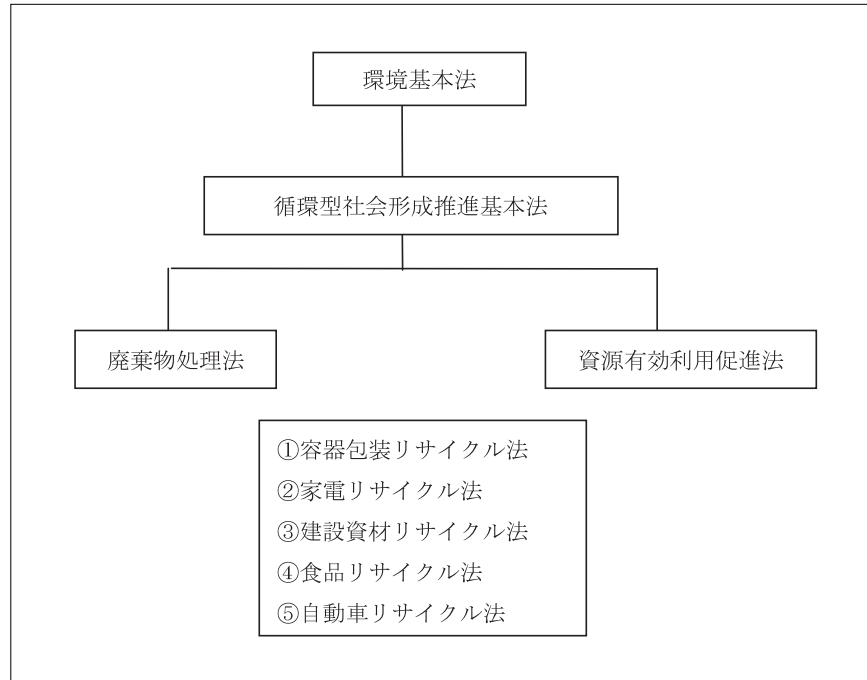
循環型社会の形成を目指した法制度（図表1）のうち、物質循環の確保、天然資源の消費抑制といった基本的な枠組みは「循環型社会形成推進基本法」に定められている。一般的な仕組みの確立のため

に、廃棄物の適正処理を目指した「廃棄物処理法」とリサイクルの推進を目指した「資源有効利用促進法」が制定されている。個別物品の特性に応じた規制が、いわゆるリサイクル関連5法であ

る。関連5法の対象は、容器包装、家電4品目、建設資材、食品、自動車であり、図表2に示したような目的や狙いがある。



図表1 循環型社会の形成推進のための法体系



(参考文献<sup>2)</sup>を基に科学技術動向研究センターが作成)

図表2 個別物品の特性に応じた規制

法令名	施行・公布時期	目的、狙い
①容器包装リサイクル法	2000年4月施行	<ul style="list-style-type: none"> <li>●容器包装の市町村による収集</li> <li>●容器包装の製造・利用者による再資源化</li> </ul>
②家電リサイクル法	2001年4月施行	<ul style="list-style-type: none"> <li>●廃家電を小売店が消費者より引き取り</li> <li>●製造業者などによる再商品化</li> </ul>
③建設資材リサイクル法	2002年5月施行	<ul style="list-style-type: none"> <li>●工事の受注者による、建築物の分別解体や建設廃材などの再資源化</li> </ul>
④食品リサイクル法	2001年5月施行	<ul style="list-style-type: none"> <li>●食品の製造・加工・販売業者が食品廃棄物の再資源化</li> </ul>
⑤自動車リサイクル法	2002年7月公布	<ul style="list-style-type: none"> <li>●自動車製造業者などによるフロン類、エアバッグ、シュレッターダストの引き取り・再資源化</li> </ul>

(参考文献<sup>2)</sup>を基に科学技術動向研究センターが作成)

### 3. リサイクル技術の開発と事業化への取り組み

廃棄物の形態が多様であるため、リサイクル技術の開発は多岐に亘っており、リサイクル事業では多数の生産品目がある。本章では、リサイクル関連法の対象になっている廃棄物のリサイクル技術について、①リサイクル技術の研究開発と事業化、②マテリアルリサイクル技術と従来型製造技術の比較、③リサイクル事業化への産学官の役割、④リサイクル事業の連関について分析する。

#### 3 - 1

#### リサイクル技術の研究開発と事業化

リサイクル技術開発の方向性は、物質の組成状態を変えないマテリアルリサイクル、化学的成分を変えるケミカルリサイクル、燃焼させて熱さらには電力として利用するサーマルリサイクルを目指したものがあるが、リサイクル技術は非常に多岐にわたるため、単純にこの3種類に分類することは難しい。

#### (1)マテリアルリサイクルとケミカルリサイクル

環境産業の振興を通じた地域振興を目的として、経済産業省は環境省と連携してエコタウン事業を推進している。このエコタウン事業などで開発されたものも含め、主なりサイクル技術とこれによる再生・生成品の利用先について、マテリアルリサイクルとケミカルリサイクルを中心として分類すると図表3のようになる。

図表3 代表的なマテリアルおよびケミカルリサイクル技術の開発状況

廃棄物の種類	リサイクル技術	再生・生成品の利用先
ポリエステル類 (PETボトル等)	● 分別および高純度フレーク化	● 一般市場向けのポリエステル衣料・事務・家庭用品など
プラスチック類	● PET原料 ● 油化 ● セメント原料化 ● 再生化 ● 塩酸や酢酸などの化学物質抽出	● 自他工場内の熱源 ● セメント製造 ● 化学薬品製造
家電、OA機器	● 分別・解体 ● フロン回収	● 金属・ガラス製品類の原材料
食品残渣、食品製造	● 飼料化 ● 生分解プラスチック化 ● 発酵による有価ガス化	● 配合飼料製造 ● 土壌改良
自動車 (シュレッダーダスト)	● 金属と非金属の分別 ● 有機材料活用 (ウレタン等) ● 油化 (廃プラスチック等)	● 金属・ガラス製品類の原材料 ● 路盤材等

(科学技術動向研究センターが作成)

図表4 代表的なサーマルリサイクル技術の開発状況

発電方式	廃棄物処理量 (トン/日)	発電形態	開発主体	技術開発水準
従来型焼却炉方式	>約600	プラスチック類や食品残渣などを燃料とし、焼却により高温高圧蒸気を発生させ、蒸気タービンで発電	大手企業	実用化
ガス化溶融方式	約200～600	廃棄物燃料を蒸し焼き状態にして可燃性ガスを発生させ、ガス燃焼時に発生する高熱を利用して蒸気タービンを駆動	大手企業、一部の大学	実用化
ガス変換方式	<約200	廃棄物燃料を蒸し焼き状態にして可燃性ガスを発生させ、ガスを改質後、内燃機関の燃料に利用	NEDO (大手企業受託)、一部の大学	開発中

(科学技術動向研究センターが作成)

## (2)サーマルリサイクル

リサイクル技術での生成品は、静脈産業での資源として活用されるほか、エネルギー源にもなっている。エネルギー源の形態としては、電力が中心であり、蒸気や水素などの有価ガスもある。発電を最終目的としたサーマルリサイクルには、主に図表4に示す技術がある。

従来型焼却炉方式では、炉内に「ストーカー」と呼ばれる箱型の金属台でゴミを送り込み加熱するストーカー炉が普及しているほか、苫小牧東部開発地域では今年11月に廃プラスチック専焼の商業発電所が、大牟田市では同12月に第3セクター方式でRDF<sup>(注1)</sup>専焼の発電所がそれぞれ稼動し始めている。

図表4の発電方式のうちで、最近最も注目を浴びている技術がガス変換発電技術である<sup>4, 5)</sup>。ガス

変換発電技術は、さまざまな廃棄物を600℃程度以上の高温で熱分解した後、さらに煤やタール分を水素ガス等へ改質することによって、燃料ガスとスラグとよばれる溶融灰に分け、燃料ガスはガスエンジンなどでの発電に利用し、スラグは道路舗装材などに利用するものである。ガス変換発電技術は、一般廃棄物、産業廃棄物を問わず幅広い廃棄物を燃料とすることが可能であり、スラグも有効利用することで、廃棄物の最終段階の処理技術としての期待がある。新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) およびその委託を受けた大手企業等は、平成13年度から200トン/日以下の比較的小規模の廃棄物処理施設で利用できるガス変換発電技術を研究している。また、東京工業大学はわずか500kg/日程度の廃棄物量でも、経済的、技術的に運用可能な小型廃棄物ガス変換発電技術を開発

し、人口8千人程度の小規模な地方自治体が導入を進めている。

(注1) Refuse Derived Fuelの略で、可燃ごみを破碎・乾燥・選別・圧縮成型して固形燃料化したもの。

### 3 - 2

## マテリアルリサイクル技術と従来型製造技術の比較

図表3に示したような再生品を生産するマテリアルリサイクル技術は、従来の一般製造業における製造技術と比べた場合、「物を作る」という同じ意味を有しているが、原料や製品規格などに大きな差がある。図表5は、両方の技術について比較したものである。

図表5に示すような差異がある大きな原因のひとつは「原料が何

図表5 マテリアルリサイクル技術と従来型製造技術の特徴の比較

比較項目		マテリアルリサイクル技術	従来型製造技術
原料	品質	分別作業の質と量に強く依存	一般に、原料精錬工場の技術に依存し、高純度
	価格	分別・収集・運搬のコストに強く依存	埋蔵量や精錬工場の生産コストなどに依存
	供給量	廃棄物の総量で限定	採掘技術や原料生産プラントの規模等で限定
	必要量の確保	事業者への保証なし	容易（輸入時の状況等に依存）
再生または製造品の規格		なし	JISやJASなど多数
技術の優位性を決定する 主要要因		最も低コストの処理技術が優位	製造コストや品質などが総合的に高い技術が 優位

(科学技術動向研究センターが作成)

か」である。従来型製造技術では、大規模な原料供給システムが整備されたため、低コスト・高品質で集中生産できる方式が広く行われている。これに対して、マテリアルリサイクル技術において原料になるのは廃棄物であるため、分別・収集・運搬にかかるコストを抑制して、最も低コストで製品を作れる技術が強い競争力をもつ。マテリアルリサイクル技術において従来型製造技術による製品と同品質の再生品が作れたとしても、限られた廃棄物量から効率的にリサイクル品を再生できる技術でなければ、割高な製品コストがネックになり市場での普及は難しい。

3 - 3  
リサイクル事業化への  
産学官の役割

研究・技術開発によって生まれ

図表6 エコタウン事業を例とした産学官民の役割

区分	役割
産業界（組合含む）	● 基本技術の開発 ● 事業化の主体
大学等の研究機関	● 技術開発の支援
行政機関	● リサイクル事業の誘致、土地の賃貸 ● 事業化における行政事務手続きの円滑化 ● 環境影響の監視
住民（市民）	● 分別作業の分担 ● 廃棄物処理施設の受け入れ同意

(科学技術動向研究センターが作成)

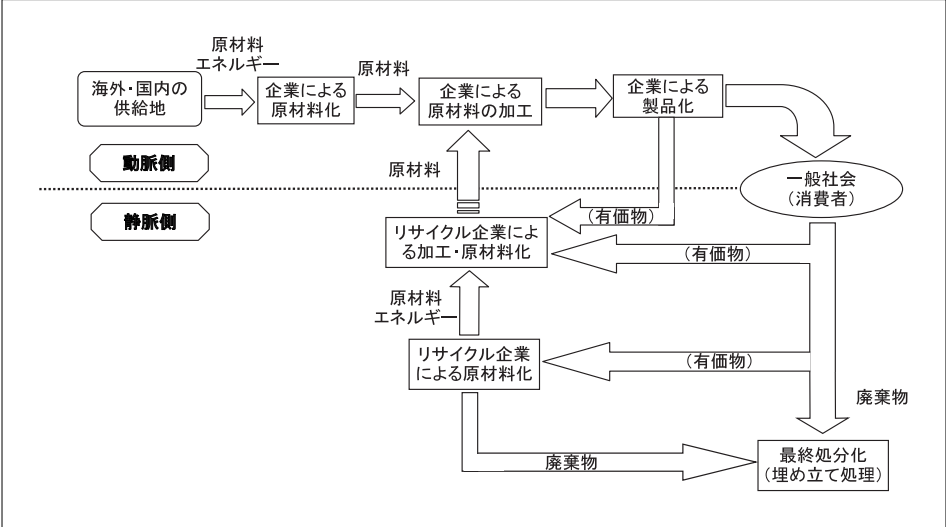
たリサイクル技術をシーズとして、産学官はそれぞれの立場でエコタウン事業などとしてリサイクル事業化に参画している。それぞれのエコタウン事業で詳細部分は異なるものの、産業界、大学を中心とした研究機関、国や地方自治体などの行政機関は、図表6に示すような役割を果たしている。リサイクル事業化においては、産学官に加えて住民（市民）の果たすべき役割も大きい。これは、住民

は一般廃棄物の排出者であって廃棄物の分別などで役割分担を求められること、廃棄物処理施設の近隣地域に居住する住民の同意なくして処理施設の設置が難しいことなどの理由による。

3 - 4  
リサイクル事業の連関

リサイクル事業による生産工程には、例えば、リサイクル業者が

図表7 動脈産業と静脈産業における簡略化した資源の流れ



(科学技術動向研究センターが作成)

PET ボトルからフレーク状のポリエステルを作り、それを原材料として企業がポリエステル繊維化して衣料品にするといった流れがある。また、札幌市リサイクル団地においては、ポリプロピレンなどの廃プラスチック製品から軽油代替燃料油などを製造している油化企業が、隣接する食品廃棄物処理

企業に対して、飼料化工程でのヒーター用燃料として燃料油を供給するといった計画もある。これらの事例は、ひとつのリサイクル事業での生産品が他のリサイクル事業の原料となることによって、二つのリサイクル事業が連関を持ち始めていることを示している。このような結びつきは一般の製造事

業における原料加工・製品化の流れと同じであって、静脈産業が動脈産業と同じ仕組みを構築しつつあることを意味している。このような状況にあるリサイクル事業と一般の製造事業との結びつきに注目すると、図表7に示すような簡略化した資源の流れ図が描ける。

## 4. ゼロエミッションを目指したリサイクル研究・技術開発

ゼロエミッションとは、1992年の地球サミットで採択された地球環境保全のための基本理念である「リオ宣言」及び行動計画「アジェンダ21」を踏まえて、1994年に国連大学が提唱した構想である。国連大学のゼロエミッション研究構想では、「ゼロエミッションは、産業に投入されるすべての資源を最終製品に活用するか、他の産業、生産工程の付加価値を持たせた資源として活用することを目指す。そうすることで、複数の産業が、すべての産業廃棄物や副産物が他の産業の資源として活用され、全体としていかなる形の廃棄物も生み出さない統合化された生産を行う、産業集団へと再編成される」と表現されている<sup>(注2)</sup>。

国連大学は「ゼロエミッション」の概念を適用できる範囲を厳密に定義しなかったため、多様な解釈が生まれ、結果として企業や地域などでゼロエミッションを謳う多様な取り組みが生まれた。ゼロエミッションを目指した活動は、3種類に分類できる。第1は、一つの工場や事業所などの産業施設に

おける取り組みである。第2は、ひとつの工業団地などにおける複数の企業による取り組みであり、27社が参加する甲府市の協同組合国母工業団地工業会の取り組みは、このタイプでの成功事例のひとつとしてよく知られている。第3は、市町村などの地域やコミュニティでの取り組みであり、北九州エコタウン事業、札幌市リサイクル団地などの事例がある。

第1と第2の活動は、図表7において動脈側にいる企業によるゼロエミッションを目指す活動として実現している。第3のモデルは、自治体等がゼロエミッションの実現を推進するとともに、静脈側にいるリサイクル企業群がその活動の一翼を担うものである。動脈側と静脈側の両方にいる企業群の目指すものは、製造・リサイクル技術体系を革新していくことによって、最終的にゴミゼロ・資源循環を実現することであり、その過程において廃棄物として最終処分化される物量を削減することでもある。

一方で、ゼロエミッションの達成を阻む要因もある。不法に大量

投棄された組成不明の廃棄物については、リサイクル研究・技術開発がほとんど進んでいない。また、動脈産業において発生するダイオキシン類などの有害危険物質は、一時保管の形で資源循環の中で留め置かれており、これを無害化処理するための早急な技術開発が求められている。

(注2) 国連大学ゼロエミッション研究構想のパフレットでは次のように表記されている。

"Zero Emissions envisages all industrial inputs being used in the final products or converted into value-added inputs for other industries or processes. In this way, industries will reorganize into "clusters" such that each industry's wastes / by-products are fully matched with others' input requirements, and the integrated whole produces no waste of any kind."

## 5. リサイクル研究・技術開発の推進

ゼロエミッションを目指す研究・技術開発について、多面的に議論しなければならない問題点は多い。議論すべき事項には、例えば、

- 大学等における研究・技術開

発のシーズと自治体からのニーズを適合させる方法はいか

- 研究・技術開発の成果を事業化に結びつけるために何が必要か
- 静脈産業を社会システムの要

素としてどのように位置づけるか

- 産業界(産)・研究機関(学)・行政(官)・地域住民(民)が担う役割は何か

などがある。本章では、これらの論点に絞って議論する。

### (1)大学の果たす役割

多くの大学の研究者は実用化できる技術の開発を目標としてさまざまな研究を進めているが、研究の水準は未だに技術開発段階にあるケースが多い。一方、多くの自治体は、一般廃棄物を処理するために、企業が実用化したリサイクル技術を導入しているが、食品廃棄物から有価ガスを取り出して発電に利用する技術や食品廃棄物を飼料化する技術など、現在大学などで開発中のリサイクル技術の導入にも関心を持っている。これまで、自治体が導入してきているリサイクル技術は、大学の成果がシーズとなっているとは言い難い。今後は、大学での研究・技術開発では、自治体のニーズを取り込みながら研究を進める必要がある。例えば、その方策の一例として、個々の自治体が抱える廃棄物問題の解決を地元にある大学に研究委託するような形式で進め、密接な協力の下で研究・技術開発に当たることが想定される。

### (2)事業化への取り組み

大学等で生まれたリサイクル技術などの廃棄物処理技術を事業として成長・普及させるためには、解決すべき二つの課題がある。第1は、大学等での研究規模と事業化規模には大きな差があり、スケール差による技術的課題が新たに生じることである。第2は、廃棄物処理委託費とリサイクル品の販売収入の合計が廃棄物のリサイクル処理費用を上回るような、効率性の良い技術開発の必要性である。

第1の課題への取り組みとしては、例えば、リサイクル技術について、これを開発した大学と事業

化に関心のある企業や自治体が連合体を形成してフィールド試験の規模で試行することが想定される。これにより、普及技術となる可能性を確認するとともに事業化規模で生ずる新たな技術的課題への対応策を講じることが可能になる。

第2の課題への取り組みとしては、参考事例として大型都市ゴミ焼却施設を中心に導入されてきた大型廃棄物燃焼発電設備が挙げられる。この燃焼発電設備のために高度な技術が開発されたが、過大な処理能力が原因となって、事業採算性が低下したことやニーズのある自治体が限定されたことなどの要因が普及の妨げになってきている。これを踏まえて、NEDO、複数の企業、大学などにより小規模で事業採算性のとれる燃焼発電設備（高効率小規模ごみ発電）の開発が進められている。このような事例を踏まえ、自治体の想定する地域での廃棄物収集計画に見合った規模を前提条件とし、設備設計と技術開発を推進する必要がある。

### (3)社会システムにおける位置づけ

静脈産業を社会システムの一員として有効に機能させることも重要である。現在は廃棄物からの再生品を直接消費者や動脈産業にいる加工業者に供給するワンパスの事業形態が主流である。その一方で、再生品を他の静脈産業の原料やエネルギー源として供給する業態も現れてきており、静脈側にいる企業がネットワーク化する兆しがある。今後の静脈産業の創生を効果的に進めるために、自治体は事業用地の貸与や行政手続の広報などで研究・技術開発の支援を行っている。これらに加えて、静脈産業で再生された原材料が積極的に利用されるようにグリーン証書のような制度を国や自治体が設け

るなど、リサイクル企業を支援する方策が必要となる。

### 謝 辞

本稿の取りまとめに当たって、国連大学・鈴木基之副学長、豊橋技術科学大学・藤江幸一教授、福岡大学・長田純夫教授には、大変お忙しいところ長時間に亘って有意義な議論をさせていただきました。また、北九州市役所およびエコタウン関連企業、札幌市役所およびリサイクル団地関連企業、大牟田市役所およびエコタウン関連企業、協同組合同母工業団地工業会、その他の企業の方々には快く見学願いをお聞き届けいただき、たくさんの有用な情報をご提供いただきました。八千代エンジニアリング株式会社技術本部副本部長の瀬山賢治氏には、社会システムにおける静脈産業の意義や有害危険物質に関わる処理技術などに関して実り多い議論をさせていただきました。

本稿は諸先生方に貴重な研究・業務時間を割いて戴いた結実であり、ここに心からの深い感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 環境省、平成14年度版環境白書、第2章第3節。
- 2) ゼロエミッション構築技術、「OHM」9月号別冊、監修吉川邦夫。
- 3) 分野別推進戦略、環境分野、p27-38。
- 4) 科学技術動向No.3、2001年6月号特集「可燃性廃棄物を熱利用する廃棄物焼却処理技術の動向と課題」。
- 5) 第2回高効率廃棄物発電技術に関するセミナー予稿集、新エネルギー・産業技術開発機構、平成14年12月12日。

---

# SCIENCE & TECHNOLOGY TRENDS

**January 2003**  
(NO.22)

## Science & Technology Foresight Center

National Institute of Science and  
Technology Policy (NISTEP)  
Ministry of Education, Culture, Sports,  
Science and Technology

※このレポートについてのご意見、お問い合わせは、下記のメールアドレスまたは電話番号までお願いいたします

なお、科学技術動向のバックナンバーは、下記の URL にアクセスいただき「報告書一覧 科学技術動向・月報」でご覧いただけます。

## 文部科学省科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター

---

連絡先：〒100-0013 東京都千代田区霞が関1-3-2  
電話 03-3581-0605 FAX 03-3503-3996  
URL <http://www.nistep.go.jp>  
Email [stfc@nistep.go.jp](mailto:stfc@nistep.go.jp)

- ▶ Life Sciences
- ▶ Information & Communication Technologies
- ▶ Environmental Sciences
- ▶ Nanotechnology & Materials
- ▶ Energy
- ▶ Manufacturing Technology
- ▶ Infrastructure
- ▶ Frontier

Science & Technology Trends

科学技術動向

《2003年1月号》

文部科学省 科学技術政策研究所  
科学技術動向研究センター